

Научно-теоретический журнал

ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

1

2022

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. В.Г. ШУХОВА

**НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ВЕСТНИК
БГТУ им. В.Г. ШУХОВА**

№ 1, 2022 год

**SCIENTIFIC AND THEORETICAL JOURNAL
BULLETIN
of BSTU named after V.G. Shukhov**

Vol. 1. 2022

Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова

научно-теоретический журнал

К рассмотрению и публикации в НТЖ «Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова» принимаются научные статьи и обзоры по фундаментальным и прикладным вопросам в области строительства, архитектуры, производства строительных материалов и композитов специального назначения, химических технологий, машиностроения и машиноведения, освещающие актуальные проблемы отраслей знания, имеющие теоретическую или практическую значимость, а также направленные на внедрение результатов научных исследований в образовательную деятельность.

Журнал включен в утвержденный ВАК Минобрнауки России Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, по научным специальностям и соответствующим им отраслям науки:

- 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)
- 05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки)
- 05.23.05 – Строительные материалы и изделия (технические науки)
- 05.23.20 – Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия(архитектура)
- 05.23.21 – Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (архитектура)
- 05.23.22 – Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (технические науки)
- 05.23.22 – Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (архитектура)
- 05.17.06 – Технология и переработка полимеров и композитов (технические науки)
- 05.17.11 – Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов (технические науки)
- 05.02.05 – Роботы, мехатроника и робототехнические системы (технические науки)
- 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)
- 05.02.08 – Технология машиностроения (технические науки)
- 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (по отраслям) (технические науки)

Все поступающие материалы проходят научное рецензирование (двойное слепое). Рецензирование статей осуществляется членами редакционной коллегии, ведущими учеными БГТУ им. В.Г. Шухова, а также приглашенными рецензентами – признанными специалистами в соответствующей отрасли знания. Копии рецензий или мотивированный отказ в публикации предоставляются авторам и в Минобрнауки России (по запросу). Рецензии хранятся в редакции в течение 5 лет.

Редакционная политика журнала базируется на основных положениях действующего российского законодательства в отношении авторского права, плагиата и клеветы, и этических принципах, поддерживаемых международным сообществом ведущих издателей научной периодики и изложенных в рекомендациях Комитета по этике научных публикаций (COPE).

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций Регистрационный номер и дата принятия решения о регистрации: ПИ № ФС77-80909 от 21 апреля 2021 г.
Учредитель/Издатель:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова) Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46
Адрес редакции:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, БГТУ им. В.Г. Шухова, оф. 724/4 Гк
Адрес типографии:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, Издательский центр БГТУ им. В.Г. Шухова
Тел:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Официальный сайт журнала:	https://bulletinbstu.editorum.ru
Подписка и распространение	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписной индекс в Объединенном каталоге «Пресса России» – 44446. (+12) Online подписка: http://www.akc.ru/itm/2558104627/ Цена свободная.
Подписан в печать	18.01.2022
Выход в свет	31.01.2022

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 14,07. Уч.-изд. л. 15,13. Тираж 40 экз. Заказ № 114

Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov

scientific and theoretical journal

Scientific articles and reviews on fundamental and applied questions in the field of construction, architecture, productions of construction materials and composites of a special purpose, chemical technologies, machine building and engineering science covering the current problems of branches of knowledge having the theoretical or practical importance and also directed to introduction of research results in educational activity are accepted to be considered and published in the journal.

The journal is included in the list for peer-reviewed scientific publications approved by the Higher Attestation Commission under the Ministry of Science and Education of the Russian Federation, which should publish the main scientific results of dissertations for the degree of candidate of Sciences, for the degree of Doctor of Sciences, for scientific specialties and relevant branches of science:

- 05.23.01** – Building structures, constructions and facilities (technical sciences)
- 05.23.03** – Heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply and lighting (technical sciences)
- 05.23.05** – Building materials and products (technical sciences)
- 05.23.20** – Theory and history of architecture, restoration and reconstruction of historical and architectural heritage (architecture)
- 05.23.21** – Architecture of buildings and structures. Creative concepts of architectural activity (architecture)
- 05.23.22** – Urban planning, rural settlement planning (technical sciences)
- 05.23.22** – Urban planning, rural settlement planning (architecture)
- 05.17.06** – Technology and processing of polymers and composites (technical sciences)
- 05.17.11** – Technology of silicate and refractory nonmetallic materials (technical sciences)
- 05.02.05** – Robots, mechatronics and robotic systems (technical sciences)
- 05.02.07** – Technology and equipment of mechanical and physical-technical processing (technical sciences)
- 05.02.08** – Engineering technology (technical sciences)
- 05.02.13** – Machines, units and processes (branch-wise) (technical sciences)

All arriving materials undergo scientific reviewing (double blind). Reviewing of articles is carried out by the members of editorial board, the leading scientists of BSTU named after V.G. Shukhov and by invited reviewers – recognized experts in the relevant branch of knowledge. Copies of reviews or motivated refusal in the publication are provided to the authors and to the Ministry of Science and Education of the Russian Federation (on request). Reviews are stored in the editorial office for 5 years.

The editorial policy of the journal is based on the general provisions of the existing Russian legislation concerning copyright, plagiarism and slander, and the ethical principles maintained by the international community of the leading publishers of the scientific periodical press and stated in the recommendations of the Committee on Publication Ethics (COPE).

Founder / Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov” (BSTU named after V.G. Shukhov) 46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation
Editorial office address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation BSTU named after V.G. Shukhov, of. 724/4
Printing house address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation Publishing Center, BSTU named after V.G. Shukhov
Tel:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Official website of the journal	https://bulletinbstu.editorum.ru
Подписка и распространение	Subscription index in the united catalogue of "Press of Russia" – 44446. Online subscription: http://www.akc.ru/itm/2558104627/
Signed for printing:	18.01.2022

Главный редактор

Евтушенко Евгений Иванович, д-р техн. наук, проф., первый проректор, заведующий кафедрой технологии стекла и керамики Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Заместитель главного редактора

Уваров Валерий Анатольевич, д-р техн. наук, проф., директор инженерно-строительного института, заведующий кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Члены редакционной коллегии

Айзенштадт Аркадий Михайлович, д-р хим. наук, проф., заведующий кафедрой композиционных материалов и строительной экологии Высшей инженерной школы, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова (РФ, г. Архангельск).
Ахмедова Елена Александровна, член-корр. РААСН, д-р арх., проф., заведующий кафедрой градостроительства Самарского государственного технического университета, Архитектурно-строительной академии (РФ, г. Самара).

Благоевич Деян, PhD, проф. Высшей технической школы по профессиональному образованию в Нише (Республика Сербия, г. Ниш).
Богданов Василий Степанович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой механического оборудования Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Борисов Иван Николаевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии цемента и композиционных материалов Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Братан Сергей Михайлович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии машиностроения Севастопольского государственного университета (РФ, г. Севастополь).

Везенцев Александр Иванович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой общей химии Белгородского государственного национального исследовательского университета (РФ, г. Белгород).

Глаголев Сергей Николаевич, д-р экон. наук, ректор Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Грабовый Петр Григорьевич, д-р экон. наук, проф., заведующий кафедрой организации строительства и управления недвижимостью, НИУ Московского государственного строительного университета (РФ, г. Москва).

Гридчин Анатолий Митрофанович, д-р техн. наук, проф., Президент Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Давидюк Алексей Николаевич, д-р техн. наук, директор НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство» (РФ, г. Москва).

Дуюн Татьяна Александровна, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии машиностроения Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Ерофеев Владимир Трофимович, академик РААСН, д-р техн. наук, проф., декан архитектурно-строительного факультета, заведующий кафедрой строительных материалов и технологий, директор НИИ «Материаловедение» Национального исследовательского Мордовского государственного университета имени Н.П. Огарёва (РФ, Республика Мордовия, г. Саранск).

Зайцев Олег Николаевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции Академии строительства и архитектуры – структурное подразделение Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского (РФ, г. Симферополь).

Ильницкая Светлана Валерьевна, д-р арх., проф., заведующий кафедрой архитектуры Государственного университета по землеустройству (РФ, г. Москва).

Кожухова Марина Ивановна, PhD, научный сотрудник кафедры гражданского строительства и охраны окружающей среды, Школа инжиниринга и прикладных наук, Университет Висконсин-Милуоки, штат Висконсин

Козлов Александр Михайлович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии машиностроения Липецкого государственного технического университета (РФ, г. Липецк).

Леонovich Сергей Николаевич, иностранный член академик РААСН, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии строительного производства Белорусского национального технического университета (Республика Беларусь, г. Минск).

Лесовик Валерий Станиславович, чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой строительного материаловедения изделий и конструкций Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Логачев Константин Иванович, д-р техн. наук, проф. кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Мещерин Виктор Сергеевич, PhD, проф., директор института строительных материалов и заведующий кафедрой строительных материалов Дрезденского Технического Университета (Германия, г. Дрезден).

Меркулов Сергей Иванович, чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой промышленного и гражданского строительства Курского государственного университета (РФ, г. Курск).

Павленко Вячеслав Иванович, д-р техн. наук, проф., директор института химических технологий, заведующий кафедрой теоретической и прикладной химии Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Павлович Ненад, PhD, проректор по научной работе и издательской деятельности, проф. Машиностроительного факультета Государственного Нишского университета (Республика Сербия, г. Ниш).

Перькова Маргарита Викторовна, д-р арх., проф., и.о. директора Высшей школы архитектуры и дизайна, Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (РФ, г. Санкт-Петербург).

Пивинский Юрий Ефимович, д-р техн. наук, проф., научный руководитель ООО «Научно-внедренческая фирма «КЕРАМБЕТ-ОГНЕУПОР» (РФ, г. Санкт-Петербург).

Потанов Евгений Эдуардович, д-р хим. наук, проф. МИРЭА – Российского технологического университета (РФ, г. Москва).

Рыбак Лариса Александровна, д-р техн. наук, проф. кафедры технологии машиностроения Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Савин Леонид Алексеевич, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой мехатроники, механики и робототехники Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева (РФ, г. Орел).

Семенов Сергей Владимирович, д-р арх., проф., заведующий кафедрой архитектурного и градостроительного наследия Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (РФ, г. Санкт-Петербург).

Сиваченко Леонид Александрович, д-р техн. наук, проф., кафедры транспортных и технологических машин Белорусского-Российского университета (Республика Беларусь, г. Могилев).

Соболев Константин Геннадьевич, PhD, проф. Университета Висконсин-Милуоки (штат Висконсин, Милуоки, США).

Смоляго Геннадий Алексеевич, д-р техн. наук, проф. кафедры строительства и городского хозяйств Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Строкова Валерия Валерьевна, проф. РАН, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой материаловедения и технологии материалов Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Фишер Ханс-Бертрам, Dr.-Ing., Ваймар (Германия, г. Веймар).

Ханин Сергей Иванович, д-р техн. наук, проф. кафедры механического оборудования Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Шاپовалов Николай Афанасьевич, д-р техн. наук, проф. Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Шубенков Михаил Валерьевич, академик РААСН, д-р арх., проф., заведующий кафедрой градостроительства, проректор по образованию в области градостроительства и урбанистики Московского архитектурного института (государственная академия) (РФ, г. Москва).

Юрьев Александр Гаврилович, д-р техн. наук, проф., кафедры теоретической механики и сопротивления материалов Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Яцун Сергей Федорович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой механики, мехатроники и робототехники Юго-Западного государственного университета (РФ, г. Курск).

CHIEF EDITOR

Evgeniy I. Evtushenko, Doctor of Technical Sciences, Professor; First Vice-Rector, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

DEPUTY OF CHIEF EDITOR

Valery A. Uvarov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

MEMBER OF EDITORIAL BOARD

Arkadiy M. Ayzenshtadt, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (Russian Federation, Arkhangelsk).

Elena A. Akhmedova, Corresponding member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Architecture, Professor, Samara State Technical University, Academy of Construction and Architecture (Russian Federation, Samara).

Deyan Blagoevich, PhD, Professor, Higher Technical School of Professional Education in Nish (Republic of Serbia, Nish).

Aleksandr I. Vezentsev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod National Research University (Russian Federation, Belgorod).

Vasiliy S. Bogdanov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Ivan N. Borisov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Sergey M. Bratan, Doctor of Technical Sciences, Professor, Sevastopol State University (Russian Federation, Sevastopol).

Sergey N. Glagolev, Doctor of Economic Sciences, Professor, Rector, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Petr G. Grabov, Doctor of Economic Sciences, Professor, Moscow State University of Civil Engineering (National research University) (Russian Federation, Moscow).

Anatoliy M. Gridchin, Doctor of Technical Sciences, Professor, President, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Aleksey N. Davidyuk, Doctor of Technical Science, Director NII ZHB named after A.A. Gvozdeva AO «NIC «Stroitel'stvo» (Russian Federation, Moscow).

Tatyana A. Duyun, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Vladimir T. Erofeev, Academician of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Institute "Materials Science", National Research Mordovian State University named after N.P. Ogarev (Russian Federation, Republic of Mordovia, Saransk).

Oleg N. Zaytsev, Doctor of Technical Sciences, Professor, V.I. Vernadsky Crimean Federal University (Russian Federation, Simferopol).

Svetlana V. Il'vitskaya, Doctor of Architecture, Professor, State University of Land Use Planning (Russian Federation, Moscow).

Marina I. Kozhukhova, PhD, Research Scientist. Department of Civil Engineering and Environmental Protection, College of Engineering and Applied Science, University of Wisconsin-Milwaukee (USA).

Aleksandr M. Kozlov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Lipetsk State Technical University (Russian Federation, Lipetsk).

Valery S. Lesovik, Corresponding member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Sergey N. Leonovich, Foreign member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belarusian National Technical University (Republic of Belarus, Minsk).

Konstantin I. Logachev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Victor S. Meshcherin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Technical University of Dresden (TU Dresden), Director of the Institute of Building Materials and head of the department of building materials (Germany, Dresden).

Sergei I. Merkulov, Corresponding member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Kursk State University (Russian Federation, Kursk).

Vyacheslav I. Pavlenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Margarita V. Per'kova, Doctor of Architecture, Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Russian Federation, Belgorod).

Nenad Pavlovich, PhD, Vice-rector for Scientific Work and Publishing Activities, Professor, Mechanical Engineering Faculty State University of Nish (Republic of Serbia, Nish).

Yuriy E. Pivinski, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the "Research and development company" KERAMBET-OGNEUPOR" (Russian Federation, Saint Petersburg).

Evgeniy E. Potapov, Doctor of Chemical Sciences, Professor, MIREA – Russian Technological University (Russian Federation, Moscow).

Larisa A. Rybak, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Leonid A. Savin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Orel State University named after I.S. Turgenev (Russian Federation, Orel).

Sergey V. Sementsov, Doctor of Architecture, Professor, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (Russian Federation, Saint Petersburg).

Leonid A. Sivachenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belarusian-Russian University (Republic of Belarus, Mogilev).

Konstantin G. Sobolev, PhD, Professor, University of Wisconsin-Milwaukee (USA).

Gennadiy A. Smolyago, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Valeriya V. Stroikova, Professor of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Hans Bertram Fischer, Dr.-Ing., Deputy Head of the Construction Materials Department, Bauhaus-University of Weimar (Bauhaus-Universität Weimar) (Germany, Weimar).

Sergey I. Khanin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Nikolai A. Shapovalov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Mikhail V. Spubenkov, Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction, Doctor of Architecture, Professor, Moscow Institute of Architecture (State Academy) (Russian Federation, Moscow).

Aleksandr G. Yur'yev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Sergey F. Yatsun, Doctor of Technical Sciences, Professor, Southwest State University (Russian Federation, Kursk).

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Иноземцев С.С., До Т.Ч., Королев Е.В.

ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ ОПЫТ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ
МАТЕРИАЛОВ С ФУНКЦИЕЙ САМОВОССТАНОВЛЕНИЯ 8

Саламанова М.Ш.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВКИ АКТИВНОГО МИКРОКРЕМНЕЗЕМА
НА СВОЙСТВА ВЯЖУЩИХ ЩЕЛОЧНОЙ АКТИВАЦИИ 23

Романовский С.А.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ ПЛИТ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОН
РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ 31

Панченко Л.А.

РАСЧЕТ ФИБРОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ ФИЗИЧЕСКОЙ
НЕЛИНЕЙНОСТИ 44

Шаптала В.В., Хукаленко Е.Е., Северин Н.Н., Гусев Ю.М.

ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ВЕНТИЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОСВАРОЧНЫХ
РАБОЧИХ МЕСТ В ПОМЕЩЕНИЯХ ОГРАНИЧЕННЫХ РАЗМЕРОВ 51

Коренькова Г.В., Митякина Н.А., Белых Т.В., Дорохова Е.И.

ФОРМИРОВАНИЕ РЕНОВАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ЖИЛОЙ ЗАСТРОЙКИ
В РОССИЙСКИХ ГОРОДАХ 60

Петухова Н.М.

ИНТЕГРАЦИЯ ПЕРВЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ВОКЗАЛОВ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГА В ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫЙ КОНТЕКСТ ГОРОДА 70

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Бондаренко Н.И., Басов В.О., Даценко А.О.

РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ ВЯЖУЩИХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
СТЕКЛООТХОДОВ 83

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Никитина И.П., Поляков А.Н., Воронин Д.Г.

СИМУЛЯЦИЯ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ
ДВУСТОРОННИХ ТОРЦЕШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКОВ 90

Шрубченко И.В., Хуртасенко А.В., Дуюн Т.А., Воронкова М.Н.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ЖЕСТКОСТИ БАНДАЖА
В РЕЗУЛЬТАТЕ МОБИЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ
КАЧЕНИЯ 102

Аль-Джарах Р.А., Осипов А.А., Першин В.Ф.

РАСЧЕТ РОТОРНОГО АППАРАТА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА
ГРАФЕНОСОДЕРЖАЩИХ СУСПЕНЗИЙ 112

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Inozemtcev S.S., Do T.T., Korolev E.V.

RUSSIAN EXPERIENCE OF RESEARCH IN THE FIELD OF BUILDING MATERIALS WITH THE FUNCTION OF SELF-HEALING 8

Salamanova M.Sh.

THE INFLUENCE OF ACTIVE MICROSILICA ADDITIVE ON BINDING PROPERTIES OF ALKALINE ACTIVATION 23

Romanovskiy S.A.

EXPERIENCE OF APPLICATION OF HEAT-INSULATING PLATES BASED ON PLANT FIBERS 31

Panchenko L.A.

CALCULATION OF FIBER-REINFORCED CONCRETE STRUCTURES TAKING INTO ACCOUNT PHYSICAL NONLINEARITY 44

Shaptala V.V., Khukalenko E.E., Severin N.N., Gusev Yu.M.

FEATURES OF VENTILATION OF ARC WELDING WORKPLACES IN SMALL ROOMS 51

Korenkova G.V., Mityakina N.A., Belikh T.V., Dorokhova E.I.

FORMATION OF RENOVATION PROCESSES OF RESIDENTIAL BUILDINGS IN RUSSIAN CITIES 60

Petukhova N.M.

INTEGRATION OF THE FIRST RAILWAY STATIONS OF SAINT PETERSBURG INTO THE URBAN PLANNING CONTEXT OF THE CITY 70

CHEMICAL TECHNOLOGY

Bondarenko N.I., Basov V.O., Dacenko A.O.

DEVELOPMENT OF BINDING COMPOSITIONS USING GLASS WASTE 83

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

Nikitina I.P., Polyakov A.N., Voronin D.G.

SIMULATION OF THE THERMAL DEFORMATION BEHAVIOR OF DOUBLE SIDED FACE GRINDERS 90

Shrubchenko I.V., Khurtasenko A.V., Voronkova M.N.

DETERMINATION OF POSSIBLE PROCESSING MODES OF THE SURFACES OF THE BANDAGES ON A SPECIAL STAND 102

Al-Jarah R.A., Osipov A.A., Pershin V.F.

CALCULATION OF ROTARY APPARATUS FOR PRODUCTION OF GRAPHENE-CONTAINING SUSPENSIONS 112

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-2-8-22

^{1,*}Иноземцев С.С., ¹До Т.Ч., ²Королев Е.В.¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет²Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

*E-mail: inozemtsevss@mail.ru

ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ ОПЫТ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ФУНКЦИЕЙ САМОВОССТАНОВЛЕНИЯ

Аннотация. В статье представлены результаты анализа научно-технической литературы, отражающий отечественный опыт исследований самовосстановления строительных материалов, которые представлены в изданиях, включенных в международные библиографические и реферативные базы данных. Тенденция изменения количества публикаций за 10 лет свидетельствует об экспоненциальном росте интереса исследователей к способности самовосстановления, при этом большая часть работ (более 50 %) опубликованы в области материаловедения. Общее количество публикаций отечественных авторов за десять лет, посвященных самовосстановлению, составляет 206 работ, из которых 49 % в области материаловедения.

Анализ статей в изданиях, включенных в международные библиографические и реферативные базы данных, опубликованных отечественными авторами, показывает, что для реализации эффекта самовосстановления предлагаются методы создания структуры материала, который содержит дополнительные элементы в виде резервного объема структурообразующего вещества. В качестве таких элементов выступают капсулы или функциональные слои с восстанавливающим агентом, при разрушении которых запускается процесс восстановления (залечивания). Так же представлены работы, где эффект восстановления достигается за счет собственного потенциала вяжущего, который не был полностью реализован на начальном этапе структурообразования. Среди материалов, в которых авторами предложена реализация эффекта самовосстановления, рассматриваются композиты на основе гидравлического минерального вяжущего (цемента) и органического вяжущего (битума) или полимера. При этом математическое описание механизмов самовосстановления в большинстве случаев отсутствует.

Ключевые слова: самовосстановление, самозалечивание, бетон, асфальтобетон, капсулы.

Введение. Долговечность всегда являлась объектом пристального внимания как разработчиков, так и эксплуатационников, оказывая существенное влияние на стоимость объекта и затраты в эксплуатационный период. Высокие требования в строительстве способствуют поиску новых эффективных технических решений, которые бы позволили увеличить качество и долговечность объектов строительства, а также снизить энергетические и финансовые затраты по их содержанию и эксплуатации [1–12]. Очевидно, что срок службы строительных конструкций зависит как от условий их эксплуатации, так и от свойств материала, из которого они произведены, в том числе способности сопротивляться внешним воздействующим факторам [13–21].

С развитием строительной отрасли возрастает потребность в использовании материалов, обладающих уникальным набором свойств, которые способствуют как увеличению функциональной эффективности конструкций, так и снижению материалоемкости производства. Новым перспективным направлением в строительном материаловедении в области увеличения сроков

службы, является разработка материалов, обладающих функцией самовосстановления, то есть способности восстанавливать собственную функциональность в конструкции, предусмотренной его назначением [22, 23].

Анализ международных библиографических и реферативных баз данных показывает, что интерес исследователей к способности самовосстановления (self-healing) в различных отраслях науки с каждым годом возрастает. Пропорционально возрастает количество публикаций как в области материаловедения в целом, так и прикладные работы по самовосстановлению бетонов и асфальтобетонов. Тенденция изменения количества публикаций за 10 лет представлена на рисунке 1.

Тенденция изменения количества публикаций за 10 лет свидетельствует об экспоненциальном росте интереса исследователей к тематике самовосстановления, при этом большая часть работ – 52,5 %, опубликованы в области материаловедения (47,5 % опубликованных работ относятся к областям – медицина, биология и т. п.). Среди публикаций в области материаловедения

14,9 % работ посвящены способности самовосстановления в бетонах, а лишь 4,9 % – в асфальтобетонах. Небольшое количество работ, посвященных асфальтобетонам, обусловлено как отсутствием надежных технологических решений по осуществлению восстановления структуры, так и наличием принципиальных отличий асфальтобетонов от строительных материалов на минеральных вяжущих веществах.

Важно отметить, что интерес ученых к данному направлению наблюдается по всему миру как в странах Европы, Северной Америки, Азии, так и стран Южной Америки. Доли публикаций авторов из разных стран с наибольшим вкладом в общую публикационную активность представлены в таблице 1.

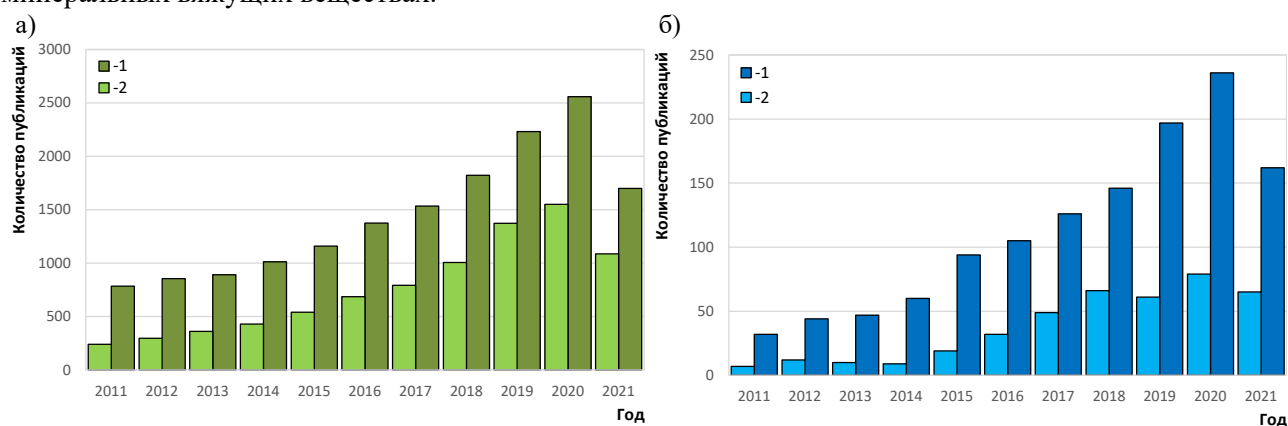


Рис. 1. Изменение количества публикаций по направлению:
(а) 1 – «self-healing»; 2 – «self-healing» в материаловедении;
(б) 1 – «self-healing» в бетонах; 2 – «self-healing» в асфальтобетонах
(по данным www.scopus.com от июля 2021 года)

Таблица 1

Доля публикаций по направлению самовосстановления ученых из разных стран

Область исследований	Доля публикаций ученых из страны, %					
	Китай	США	Нидерланды	Великобритания	Юж. Корея	Россия
Бетоны	17,8	8,3	5,7	4,7	3,4	0,8
Асфальтобетоны	36,5	9,7	9,2	6,5	1,9	1,0

Лидерами в области научных исследований по числу публикаций, посвященных самовосстановлению в области строительного материаловедения, является Китай и США, вклад которых составляет 17,8 % и 8,3 % статей, соответственно,

посвященных бетонам, а асфальтобетонам – 36,5 % и 9,7 %, соответственно. В России так же наблюдается увеличение количества публикаций, посвященных технологии самовосстановления (рис. 2).

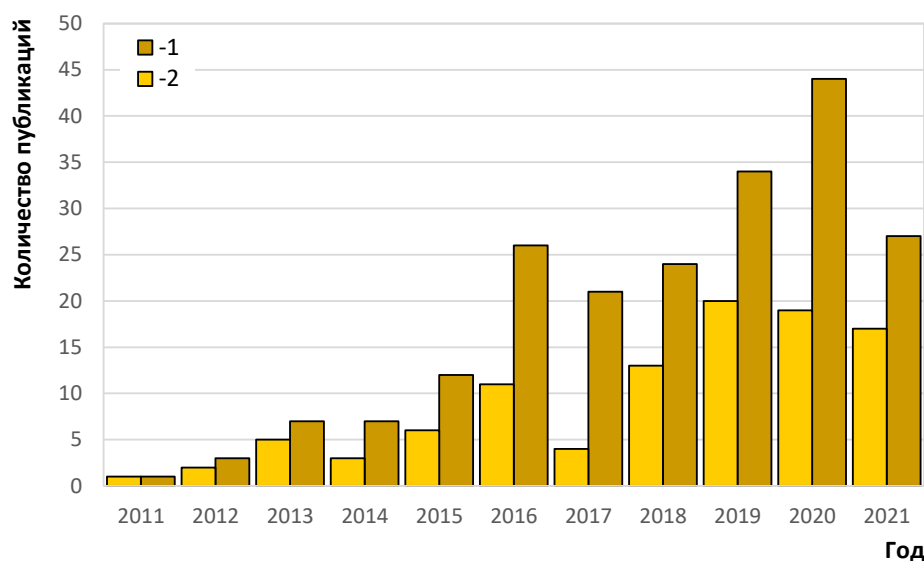


Рис. 2. Изменение количества публикаций по направлению:
1 – «self-healing»; 2 – «self-healing» в материаловедении (по данным www.scopus.com от июля 2021 года)

Общее количество публикаций, посвященных самовосстановлению, отечественными авторами за десять лет составляет 206 работ, из которых 49 % в области материаловедения. При этом стоит отметить, что динамика изменения количества публикаций во времени имеет хотя и положительный тренд, но по темпам, отстающий от общемирового, в том числе в области асфальтобетонов.

Материалы и методы. В настоящей работе используется комплекс общенаучных логических методов исследования, основанных на теоретическом анализе технологических решений, представленных в научно-технической литературе, информационных ресурсах разработчиков и средствах массовой информации, в том числе патентах, научных статьях и научных отчетах.

Основная часть. В статье [24] по результатам оценки перспектив применения самовосстанавливающихся материалов и технологий на их основе авторами сделан вывод, что самовосстанавливающийся материал рассматривается, как

инструмент для увеличения срока службы различной продукции в области строительства, дорожной отрасли, автомобилестроения, резиновой и лакокрасочной промышленности. Отмечается, что наиболее простыми материалами, где может быть реализована технология самовосстановления, являются полимеры и композиты на их основе.

В работах [25, 26] представлены результаты исследования слоистых композитов с боросилоксановой матрицей, в которых один или несколько слоев обеспечивают способность самовосстановления. В качестве матрицы предложен боросилоксан, обладающий вязкими свойствами при статической нагрузке и эластичными свойствами – при кратковременной или ударной нагрузке, что позволяет реализовать функцию самовосстановления. Механизм самовосстановления основывается на направленном массопереносе к дефекту (рис. 3).

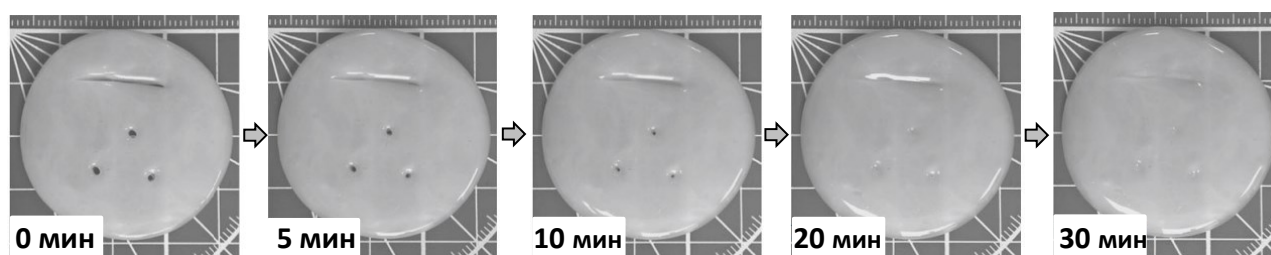


Рис. 3. Заживление образца боросилоксанового композита после пореза и прокола через 0; 5; 10; 20; 30 мин

Доказано, что заживление слоистого композита с боросилоксановой матрицей после прокола диаметром 0,8–2,5 мм обеспечивает герметичность за короткий промежуток времени, через 1–2 секунду, а восстановление изначальной сплошности структуры достигается через 40 минут.

В 2019 году авторами получен патент [27] на композиционный слоистый самозалечивающийся материал для изготовления конструкций, которым необходима защита от возникновения дефектов, в частности для изготовления конструкций с внутренней атмосферой, например, для герметичных объектов. Изобретение относится к слоистым композитам, содержащим два внешних гибких слоя и композитный слой, состоящий из органосилоксановой матрицы и наполнителя, а также дополнительно содержит слой из боросилоксанового олигомера или полимера, расположенного между композитным слоем и внешним гибким слоем. При этом внешние гибкие слои включают материал, обладающий сродством к органосилоксанам. Представленные ва-

рианты материалов могут быть армированы стеклотканью или углеродными, базальтовыми, арамидными волокнами или смесью волокон.

В статье [28] представлены результаты исследования эффекта самозалечивания высокопрочного бетона, подвергнутого деструкции при циклическом замораживании (рис. 4). В работе для исследуемых образцов бетона осуществлялась оценка степени деструкции и степени самозалечивания. Степень деструкции определялась по отношению показателя физических свойств (предел прочности) до начала замораживания и после 37 циклов замораживания-оттаивания. Степень самозалечивания рассчитывалась, как отношение значения показателя физических свойств (предел прочности) после периода отдыха (восстановления), к значению до начала этого периода.

Показано, что для исследуемых образцов бетона наблюдается закономерное снижение прочности под влиянием деструктивных процессов, связанных с замораживанием-оттаиванием, которое частично компенсируется ростом прочности в результате самозалечивания в период отдыха.

Причиной наблюдаемого эффекта является особенности структуры цементного камня и бетона, а также потенциале негидратированного цемента (клинкерный фонд), который обуславливает способность обратимого изменения свойств. Так, в модифицированном высокопрочном бетоне на

28 суток отмечается степень гидратации цемента $\alpha = 0,5 \dots 0,6$ (норма $\alpha = 0,8 \dots 0,9$), что свидетельствует о нереализованном клинкерном фонде. Поэтому в исследуемых бетонах структурообразующие процессы преобладают над деструктивными, и проявляется эффект самозалечивания.

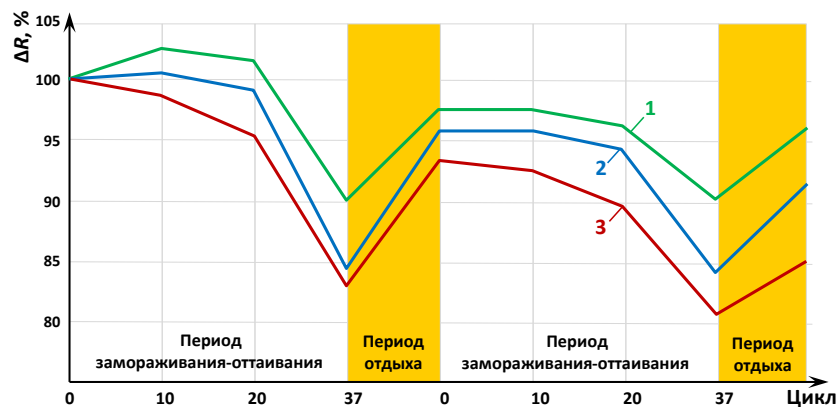


Рис. 4. Кинетика изменения прочности образцов бетона: 1 – состав с органоминеральным модификатором и кремнийорганической эмульсией; 2 – состав органоминеральным модификатором; 3 – контрольный состав

Результаты исследования самозалечивания трещин в глиноцементнобетонных (ГЦБ) диафрагмах земляных плотин (ЗП), выполненных методом буросекущих свай в качестве противофильтрационного элемента (ПФЭ), представлены в работе [29]. Для реализации эффекта самозалечивания и обеспечения фильтрационной прочности плотины в случае образования трещины ПФЭ, в конструкции переходных зон предусматривается устройство специального «залечивающего» слоя. При образовании трещины в ГЦБ и дальнейшем ее раскрытии образуется градиент напора в сторону полости дефекта, который превышает критическое значение градиента напора для «залечивающего» слоя. В результате материал залечивающего слоя увлекается фильтрационным потоком в образовавшуюся полость трещины и заполняет ее, восстанавливая сплошность ПФЭ плотины. В качестве материала залечивающего слоя авторами предлагается использовать песчаный грунт с крупностью частиц менее 5 мм.

Авторами [30] проведен сравнительный анализ материалов на основе неорганических вяжущих, среди которых рассматривались портландцемент, магнезиальный оксихлоридный цемент и гипс. Отмечается, что во всех рассматриваемых системах наблюдается самовосстанавливающий эффект, проявляющийся в разной степени для каждого вида вяжущего. Так, в образцах на основе портландцемента трещины заполняются гидроксидом кальция, который со временем может карбонизироваться, в образцах магнезиального оксихлоридного цемента трещины заполняются гидроксидом магния, а в образцах гипса –

дигидратом гипса. Однако, несмотря на заполнение трещин, прочность образцов восстанавливается незначительно, и автор отмечает необходимость использования дополнительных мер по залечиванию.

Авторами статьи [31] предложен новый метод получения пористых композитов с повышенной прочностью и способностью самовосстановления бетонной конструкции. Суть метода заключается, во-первых, в создании плотной и высокопрочной структуры материала и, во-вторых, во введении химически активного минерального материала, входящего в состав мелкодисперсного наполнителя (сульфида железа). Такое сочетание обеспечивает формирования этtringитоподобных железосодержащих гидратов кальция в объеме бетона в процессе трещинообразования.

Коллектив автора опубликовал работу [32], в которой было предложено использовать метод ионно-плазменной обработки для управления сорбционной способностью природных цеолитов, которые предполагается применять в качестве носителей активных биомодификаторов (бактерий *Bacillus pasteurii*), обеспечивающих бетоны способностью к самовосстановлению. В работе показана большая эффективность предлагаемого метода модифицирования сорбентов в сравнении с традиционным методом термической обработки. А в работе [33] представлены результаты исследования способности строительных материалов на основе портландцемента и гипсового вяжущего к самовосстановлению при использовании капсул с аэробными бактериями. Отмечается существенное влияние на реологические свойства цементно-песчаных растворов при

добавлении биологических поверхностно-активных веществ, входящих в состав клеток микроорганизмов, а также установлено влияние содержания капсул на время схватывания и физико-механические свойства получаемого композита. Так же доказано [34], что использование в качестве носителя активного биомодификатора высокопористого цеолита позволяет реализовать в цементных композитах технологию самовосстановления, позволяющей с помощью продуктов жизнедеятельности бактерий колюматировать дефекты.

Авторы в работе [35] рассматривают способность уробактерий к осаждению карбоната кальция с целью использования при получении самозалечивающегося бетона, залечивании трещин и реставрации бетонных сооружений. Проведенный скрининг микроорганизмов позволил выявить наиболее активные уробактерии, *Lysinibacillus macroides* и *Bacillus licheniformis*, из гиперсоленых озер. Использование данных видов бактерий позволяет реализовать технологию биокальцинирования в составе цементной смеси

и повысить прочность цементного камня и снизить пористость и водопоглощение. Авторами отмечается высокая и длительная активность бактериальных препаратов при залечивании дефектов в цементном камне.

В работе [36] исследовано девять видов бактерий, способных к осаждению карбоната кальция в процессе жизнедеятельности, которые пригодны для создания биомодифицированных материалов. Установлено, что все рассматриваемые бактерии проявляют высокую активность биоминерализации CaCO_3 , которая возрастает с ростом pH в содержащей мочевины среде. Выделено пять штаммов, способных к полному заполнению дефектов карбонатом кальция (*Bacillus licheniformis* DSMZ 8782, *Bacillus cereus* 4b, *Staphylococcus epidermidis* 4a, *Micrococcus luteus* BS52, *Micrococcus luteus* 6).

В обзоре [37] собрана информация об участии представителей различных физиологических групп микроорганизмов в формировании наноразмерных частиц минералов карбоната кальция (рис. 5).

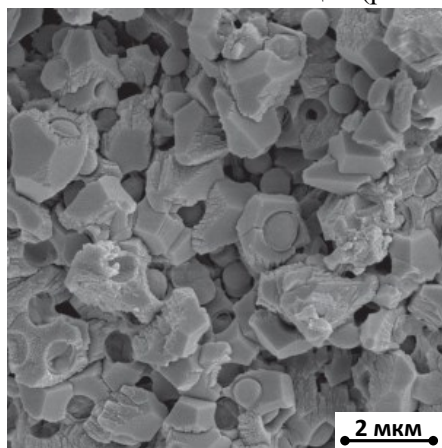


Рис. 5. Микрофотография образца биоцемента, полученного с использованием бактерии *Sporosarcina pasteurii* [37]

Показано, что этот процесс наиболее изучен у представителей групп аэробных микроорганизмов, тогда как информации об участии анаэробных микроорганизмов гораздо меньше. Отмечено, что среди рассмотренных способностью к образованию карбоната кальция обладают представители различных групп микроорганизмов: окислительных и аноксигенных фототрофных микроорганизмов, аэробных органотрофных бактерий, в том числе аммонифицирующих бактерий,

Sporosarcina pasteurii → *Bacillus pumilus* → *Bacillus megaterium* → *Lysinibacillus sphaericus*.

Интенсивность осаждения рассчитывается по коэффициенту закрытия трещин.

В работе [39] представлены результаты практической апробации технологии биомоди-

а также ряд анаэробных микроорганизмов, таких как сульфатредуцирующие бактерии, метаногены, микроорганизмы, осуществляющие анаэробное окисление метана и денитрифицирующие бактерии.

На основании сравнительного анализа интенсивности бактерий по активности в процессе осаждения карбоната кальция в области дефектов авторами [38] ранжированы по эффективности в следующем порядке по убыванию:

фицированного цементного раствора при устройстве нефтяных скважин Чунгуан (Chunguang) в Китае, проведенной в рамках совместной исследовательской работы отечественными и зарубежными учеными. Для приготовления цементного

раствора использовались сточные воды молочных промышленных предприятия, которые выполняли функцию питательной среды для активной жизнедеятельности бактерий и осаждения карбоната кальция. Отмечается повышенная плотность и прочность получаемых композитов в сравнении с традиционными составами.

Реализация технологии самовосстановления в асфальтобетонах с использованием капсул, содержащих активные кальций осаждающие виды бактерий, сопряжена с рядом технологических сложностей. Так, приготовление асфальтобетонной смеси осуществляется при температурах более 120 °С и бактерии в капсулах в таких условиях не способны будут выжить. Поэтому в качестве восстанавливающего агента в капсулах для реализации самовосстановления в асфальтобетонах необходимо использовать альтернативные виды модификаторов, учитывающих особенности применяемого вяжущего.

В условиях разработки технологического решения для обеспечения самовосстановления асфальтобетонов в работе [40] предложены критерии качества, с помощью которых можно оценить эффективность самовосстанавливающей способности. В качестве характеристик, позволяющих оценить эффективность восстановления эксплуатационного состояния асфальтобетона с помощью технологии самовосстановления, предложены: степень восстановления эксплуатационного состояния структуры; своевременность инициирования процесса самовосстановления; скорость процесса восстановления эксплуатацион-

ного состояния структуры; долговечность эксплуатационного состояния после самовосстановления.

В работе [41] в качестве вещества, применяемого для создания капсул (инкапсулятора), рассмотрен альгинат натрия. Его использование для приготовления альгинатного раствора и эмульсии восстановителя на его основе, позволяет получать кальций альгинатные капсулы. Технологический процесс синтеза капсул с помощью альгината натрия состоит из четырех этапов: приготовление альгинатного раствора; приготовление альгинатной эмульсии восстановителя; деление альгинатной эмульсии на отдельные капли; закрепление отдельных капель альгинатной эмульсии через раствор кальциевой соли; сушка альгинатных капсул. Показано, что альгинаты являются эффективным компонентом, позволяющим реализовать технологию инкапсулирования модификаторов (восстановителей) для самовосстанавливающихся асфальтобетонов.

Учитывая высокую температуру приготовления асфальтобетонной смеси, важным требованием к инкапсулированному модификатору является термическая стойкость как стенок капсул, так восстанавливающего агента. В работе [42] представлены исследования термомеханических свойств кальций альгинатных капсул с восстановителем для асфальтобетонов. Показано, что при приготовлении асфальтобетонной смеси воздействие температур от 140 до 170 °С приводит к снижению прочности капсул при воздействии температуры (рис. 6).

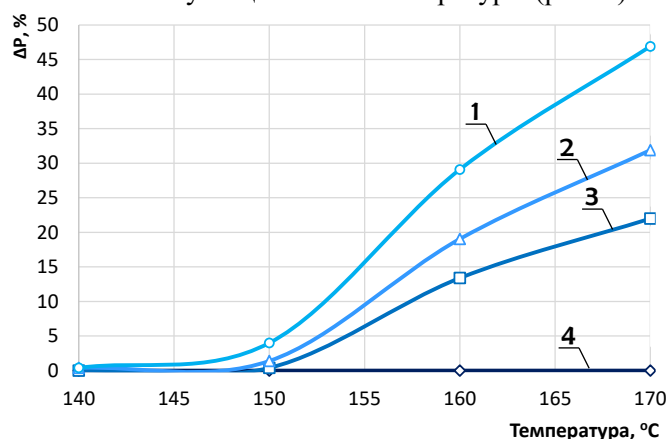


Рис. 6. Зависимость относительного изменения разрушающей нагрузки от температуры воздействия на капсулы при экспозиции: 1 – контрольный; 2 – 1 час; 3 – 2 часа; 4 – 4 часа

Отмечается, что влияние температуры 140 °С на прочность капсул незначительно, а при 150 °С прочность снижается всего на 4 %. Установлено, что изменения структуры альгината кальция происходят при температуре выше 155 °С. Таким образом, меньшее влияние на физико-механические свойства капсул оказывает температура, не

превышающая 150 °С, что позволяет использовать инкапсулированный модификатор в составе асфальтобетона при приготовлении горячих асфальтобетонных смесей.

Установлена рецептурная граница, в приближении которой соотношение компонентов обеспечивает получение структурированных систем, что может быть

использовано при проектировании составов для инкапсулирования различных типов восстанавливающих агентов [43, 44]. Указанная рецептурная граница описывается зависимостью изменения соотношением О/А (восстановитель/альгинат натрия), при котором достигается максимальная степень структурируемости эмульсий, от содержания альгината натрия в системе и имеет вид: $O/A = 26,734x^{-2,543}$ (здесь x – содержание альгината натрия). Отмечается, что получение

структурированных эмульсий обеспечивает большую стойкость альгинатных эмульсий к сегрегации, время начало которой определяется соотношением О/А и может быть описано зависимостью $t_d = -0,5216 \cdot O/A + 10,25$. Показано, что структура стабильных альгинатных эмульсий характеризуется средним размером частиц дисперсной фазы от 5 до 7 мкм, среднее расстояние между которыми от 7 до 9 мкм (рис. 7).

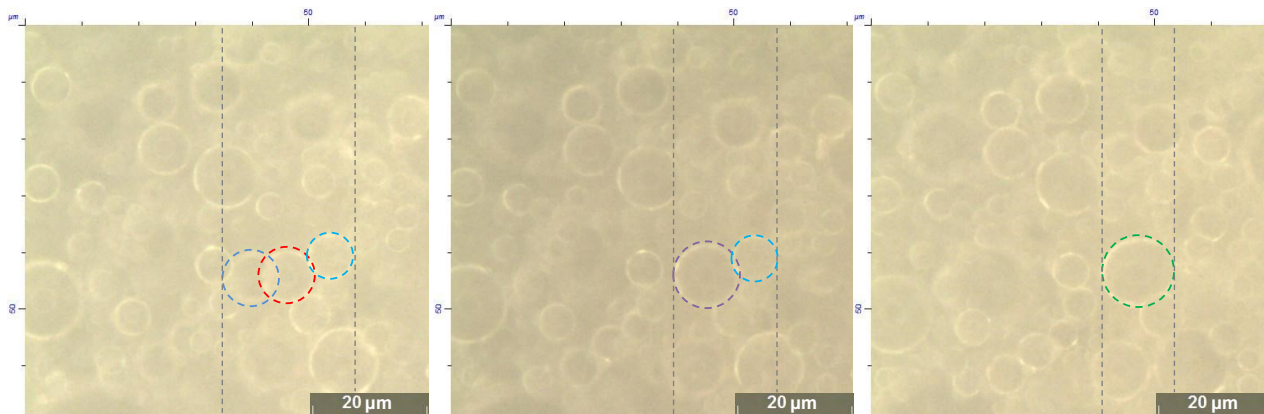


Рис. 7. Микрофотография процесса объединения частиц эмульсии (слева направо)

Со временем наблюдается изменение гранулометрического состава альгинатной эмульсии, появляющееся вследствие естественных процессов броуновского движения и агрегирования дисперсной фазы. При этом в течение 5 дней в среднем диаметр частиц увеличивается на 28 %, а вязкость – в 4 раза.

В работе [45] рассмотрена возможность использования в качестве восстанавливающего

агента активного полимерного компонента для реализации технологии самовосстанавливающегося асфальтобетона. Установлено, что эффективным восстанавливающим агентом, способным заменить традиционные восстановители на основе углеводородных масел, является тиолсодержащий уретановый AR-полимер. AR-полимер является восстановителем, инкапсулирование которого возможно с помощью альгинатной технологии (рис. 8).

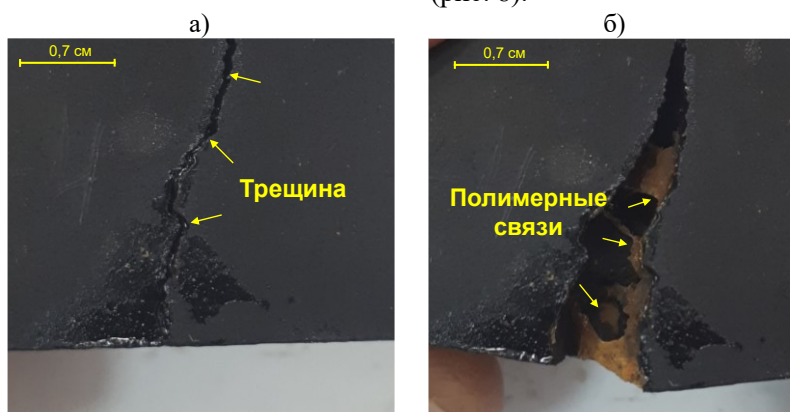


Рис. 8. Залеченная трещина до (а) и после (б) нагружения

Объем восстановителя в капсуле ограничивается максимальным допустимым значением 83 ± 1 %, которое можно достичь с помощью альгинатной технологии. Доказано, что вид и свойства восстанавливающего агента не оказывает влияния на изменение механических свойств капсул. Уменьшение содержания альгината натрия с

3,33 до 2,08 % приводит к снижению прочности капсул на 2...6 % при различных соотношениях RA/A (восстанавливающий агент/альгинат натрия). Наибольшая эффективность капсул при максимальном содержании AR-полимера в качестве

восстанавливающего агента и большей прочностью достигается для эмульсий, содержащих 2,50 % альгината натрия при $RA/A = 5,0 \pm 0,2$.

Разработка технических решений по реализации технологии самовосстановления в материалах является основным направлением научно-исследовательских работ, которое также сопряжено с решением задачи оценки эффективности таких решений. Отсутствие общей теории самовосстановления способствует появлению различных подходов по оценке эффекта самовосстановления. Наиболее простым и часто используемым методом является расчет относительного изменения показателя физико-механических свойств материала после и до процесса восстановления [22–24, 28–31].

В работах [40, 45] предложена методика расчета коэффициента восстановления (healing efficiency), учитывающего относительную разницу потери прочности, термопластичного композита с применением инкапсулированного модификатора и без него. Предложенный коэффициент восстановления отражает влияние инкапсулированного модификатора на изменение прочности исследуемого композита, поэтому для оценки эффективности самовосстанавливающегося материала необходимо учитывать, как свойства в начальный период времени, так и их скорость изменения в условиях эксплуатации. Отмечено также, что проблема выбора оптимального показателя свойств материала для оценки эффекта восстановления и усовершенствования методики расчета с учетом продолжительности периода восстановления является не решенной и требует дополнительных масштабных исследований.

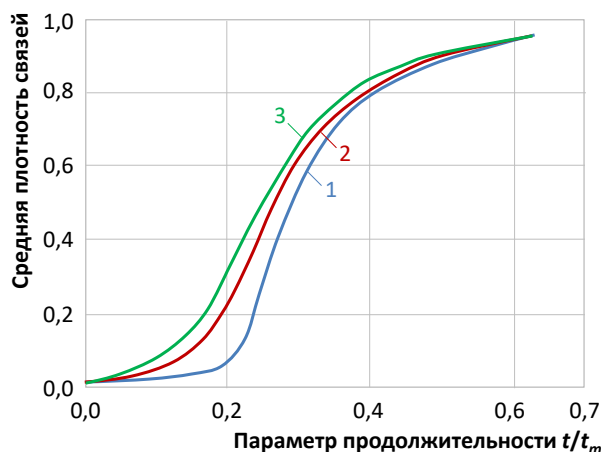


Рис. 9. Средняя плотность связей вдоль трещины после восстановления при податливости связей $c_0 = 0,01$ (1); $0,05$ (2); $0,1$ (3)

Предложенный подход может быть использован для исследования цикла формирования и залечивания трещин, оценки изменения коэффи-

Процесс самозалечивания представляется собой ликвидацию трещин, по средством потенциала материала за счет формирования связей в концевой области дефектов, в результате которого восстанавливается функциональность (работоспособность). В цикле работ [46–48] предложена модель кинетики самозалечивания трещин, основанная на объединении подходов механики, физики и химии за счет использования кинетической термофлуктуационной теории и модели концевой области трещин. Моделирование процесса формирования связей (восстановления) описывается с использованием кинетического уравнения первого рода, характеризующее увеличение плотности связей $n_h(x,t)$ между поверхностями дефекта (трещины):

$$\frac{dn_h(x,t)}{dt} = \frac{n_0 - n_h(x,t)}{\chi \sqrt{\frac{u_x^2(x,t) + u_y^2(x,t)}{H}} \frac{\alpha h}{kT} \exp\left(\frac{U_h}{RT}\right)}, \quad (1)$$

где u_x и u_y – компоненты раскрытия трещины на краю концевой области; H – линейный размер, пропорциональный толщине зоны неоднородности на участке соединения материала; χ – эмпирический коэффициент; α – коэффициент учитывающий тип материала; h – постоянная Планка; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; U_h – энергия активации восстановления связей; R – универсальная газовая постоянная; n_0 – максимальная плотность связей. При этом числитель уравнения характеризует интенсивность процесса восстановления связей, а знаменатель – время протекания этого процесса, результатом которого является изменение плотности связей и напряжений на концевой области трещины (рис. 9 и 10).

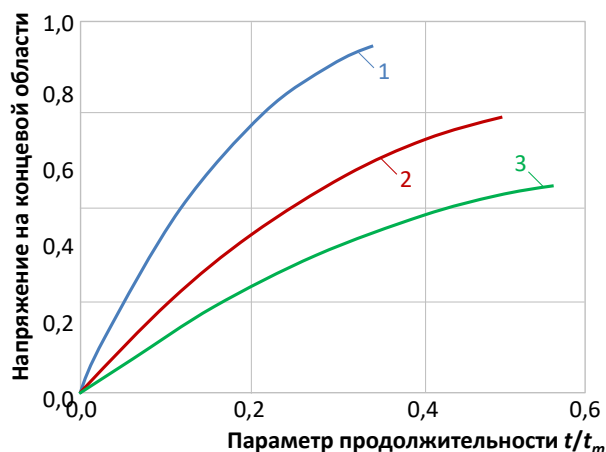


Рис. 10. Относительные напряжения на краю концевой области при восстановлении по длине трещины: 25 % (1); 50 % (2); 75 % (3)

циентов интенсивности напряжений, сравнительного анализа различных способов самовосстановления, особенностей протекания этого процесса для различных типов материалов.

Так же актуальным вопросом при исследовании особенностей структурных связей в материале и его способности к их самостоятельному восстановлению является поиск и разработка методов, позволяющих определить показатели, характеризующие их количество, прочность, равномерность и т. п.

В работе [49] представлен анализ мирового опыта применения метода акустической эмиссии для исследования особенностей локальной перестройки структуры, особенностей химических реакций, в том числе коррозии; влияния магнитного и радиационного воздействия на структуру, а также фазовых превращений. Отражен опыт использования метода АЭ для исследования особенностей структуры материалов на основе органических вяжущих, в том числе асфальтобетонов. Сделан вывод о перспективности использования метода акустической эмиссии для описания изменений структуры асфальтобетона, происходящих в процессе самовосстановления.

Таким образом, работы отечественных исследователей в области самовосстановления строительных материалов преимущественно направлены на поиск технических решений по реализации технологии самостоятельного восстановления.

Выводы.

1. Интерес исследователей к способности самовосстановления в различных отраслях науки с каждым годом возрастает. Лидерами в области научных исследований по числу публикаций, посвященных самовосстановлению в области строительного материаловедения, является Китай и США. Доля статей, опубликованных российскими исследователями, в указанных направлениях составляет 0,8 % и 1,0 %, соответственно, посвященных бетонам и асфальтобетонам. При этом активность исследователей в разные годы изменяется волнообразно, что может свидетельствовать об отсутствии системного подхода при разработке указанного направления.

2. Анализ статей в изданиях, включенных в международные библиографические и реферативные базы данных, опубликованных отечественными авторами, можно сделать вывод, что для реализации эффекта самовосстановления предлагаются методы создания структуры материала, который содержит дополнительные элементы в виде резервного объема структурообразующего вещества. В качестве таких элементов выступают капсулы или функциональные слои с восстанавливающим агентом, при разрушении которых запускается процесс восстановления (залечивания). Так же представлены работы, где эффект восстановления достигается за счет собственного потенциала вяжущего, который не был

полностью реализован на начальном этапе структурообразования. Среди материалов, в которых авторами предложена реализация эффекта самовосстановления, рассматриваются композиты на основе гидравлического минерального вяжущего (цемента) и органического вяжущего (битума) или полимера. При этом математическое описание механизмов самовосстановления в большинстве случаев отсутствует.

3. Отсутствие единой системы оценки не позволяет объективно сравнивать эффективность различных технологических решений по реализации технологии самовосстановления в строительных материалах, а также производить оценку влияния управляющих рецептурно-технологических факторов на процесс самовосстановления и его результат, что затрудняет развитие и совершенствование существующих технических решений, и разработку новых более эффективных. При этом отсутствие научно обоснованных положений не позволяет дать определение понятию самовосстановления и описать в терминах материаловедения принцип проявления этого явления в материалах, что затрудняет формулирование условий для реализации функции самовосстановления и определение эффективных способов реализации в выбранной области исследования.

4. Для развития направления самовосстановления в строительных материалах необходимо получение научно обоснованных положений о явлении самовосстановления, условиях для реализации функции самовосстановления и определение эффективных способов реализации в выбранной области исследования. Основными задачами, требующими внимания исследователей в настоящий момент, являются:

- обоснование термина самовосстановление и формулирование теоретического описания этого явления в терминах материаловедения;
- выявления показателей свойств, позволяющих оценить эффект от самовосстановления;
- разработка репрезентативной методики для определения показателей свойств, позволяющей оценить эффект от самовосстановления;
- исследование особенностей собственного потенциала к самовосстановлению традиционных строительных материалов;
- определение граничных условий параметров структуры материалов, для которых может быть реализована функция самовосстановления с использованием отдельно взятой технологии самовосстановления;
- определение параметры дефектов или структурных преобразований материалов, возникающих при эксплуатации, на которые может оказать воздействие инкапсулированный модификатор.

Благодарности: исследования выполнены при поддержке Головного регионального центра коллективного пользования научным оборудованием и установками НИУ МГСУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лесовик В.С. Геоника (геомиметика) как трансдисциплинарное направление исследований // Высшее образование в России. 2014. № 3. С. 77–83.
2. Elistratkin M.Y., Lesovik V.S., Alfimova N.I., Shurakov I.M. On the question of mix composition selection for construction 3d printing // Materials Science Forum. 2018. T. 945 MSF. Pp. 218–225.
3. Ватин Н.И., Чумадова Л.И., Гончаров И.С., Зыкова В.В., Карпеня А.Н., Ким А.А., Финашенков Е.А. 3D-печать в строительстве // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. № 1 (52). С. 27–46.
4. Makul N., Fediuk R., Amran M., Zeyad A.M., Murali G., Vatin N., Klyuev S., Ozbakkaloglu T., Vasilev Yu. Use of recycled concrete aggregates in production of green cement-based concrete composites: a review // Crystals. 2021. Vol. 11. P. 232.
5. Лесовик В.С., Строкова В.В. О развитии научного направления "Наносистемы в строительном материаловедении" // Строительные материалы. 2006. № 9. С. 93–101.
6. Логанина В.И., Макарова Л.В., Тарасов Р.В., Давыдова О.А. Оптимизация состава композитов общестроительного назначения, модифицированных наноразмерными добавками // Региональная архитектура и строительство. 2010. № 2. С. 53–57.
7. Loganina V.I., Ryzhov A.D. Structure and properties of synthesized additive based on amorphous aluminosilicates // Case Studies in Construction Materials. 2015. Vol. 3. С. 132–136.
8. Fediuk R.S., Lesovik V.S., Svintsov A.P., Mochalov A.V., Kulichkov S.V., Stoyushko N.Y., Gladkova N.A., Timokhin R.A. Self-compacting concrete using pretreated rice husk ash // Magazine of Civil Engineering. 2018. № 3 (79). Pp. 66–76.
9. Makarov D.B., Krasnikova N.M., Morozov N.M., Ayupov D.A., Borovskikh I.V., Khokhryakov O.V., Yagund E.M., Khozin V.G. Improving the quality of materials for highway construction. ARPN // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. № 11. 3035.
10. Хозин В.Г., Абдрахманова Л.А., Низамов Р.К. Общая концентрационная закономерность эффектов наномодифицирования строительных материалов // Строительные материалы. 2015. № 2. С. 25–33.
11. Klyuev S.V., Klyuev A.V., Shorstova E.S. Fiber concrete for 3-d additive technologies // Materials Science Forum. 2019. Vol. 974. Pp. 367–372.
12. Тамразян А.Г. Бетон и железобетон: проблемы и перспективы // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 7. С. 51–54.
13. Fediuk R., Amran M., Vatin N., Vasilev Y., Lesovik V., Ozbakkaloglu T. Acoustic properties of innovative concretes: a review // Materials. 2021. № 14. Pp. 328.
14. Inozemtcev A.S., Korolev E.V. Features of the defectiveness of nanomodified high-strength lightweight concrete based on hollow microspheres // Key Engineering Materials. 2017. Vol. 743 KEM. Pp. 68–72.
15. Lesovik V., Ayzenshtadt A., Frolova M., Lesovik R., Strokov V. «Green» composites for north- arctic region development // Open Ecology Journal. 2014. Vol. 7. Pp. 32–36.
16. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Increasing the Weathering Resistance of Asphalt by Nanomodification // Materials Science Forum. 2019. Vol. 945. Pp. 147–157.
17. Котлярский Э.В., Гридчин А.М., Лесовик Р.В. факторы, способствующие разрушению структуры асфальтобетона в процессе эксплуатации дорожных асфальтобетонных покрытий. Белгород, 2012. 187 с.
18. Fediuk R., Kuzmin D., Cherneev A., Batarshin V., Garmashov I., Lesovik V., Ibragimov R. Concretes for underwater structures // Key Engineering Materials. 2018. Vol. 769 KEM. Pp. 3–8.
19. Nelyubova V.V., Strokov V.V., Sumin A.V., Jernovskiy I.V. the structure formation of the cellular concrete with nanostructured modifier // Key Engineering Materials. 2017. Vol. 729. С. 99–103.
20. Панченко А.И., Харченко И.Я., Васильев С.В. Долговечность бетонов с компенсированной химической усадкой // Строительные материалы. 2019. № 8. С. 48–53.
21. Старцев В.О., Низина Т.А. Прогнозирование климатического старения эпоксидных полимеров по изменению цветовых показателей // Труды ВИАМ. 2015. № 12. С. 10.
22. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Review of road materials self-healing: problems and perspective // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 855. С. 012010.
23. Баженов Ю.М., Ерофеев В.Т., Салман А.Д. С.Д., Смирнов В.Ф., Фомичев В.Т. Технология самовосстановления железобетонных конструкций с помощью

микроорганизмов // Русский инженер. 2018. № 4 (61). С. 46–48.

24. Sitnikov N.N., Khabibullina I.A., Mashchenko V.I., Rizakhanov R.N. Prospects of Application of Self-Healing Materials and Technologies Based on Them // Inorganic Materials: Applied Research. 2018. Vol. 9 № 5. Pp. 785–793.

25. Mashchenko V.I., Sitnikov N.N., Khabibullina I.A., Kuzmin M.K., Chausov D.N. Structure and properties of self-healing materials based on hydroxyl terminated polydimethylsiloxane and boric acid // Journal of Physics: Conference Series. International Interdisciplinary Scientific Conference on Advanced Element Base of Micro- and Nano-Electronics. 2002. Vol. 1560. Pp. 012037.

26. Sitnikov N.N., Khabibullina I.A., Mashchenko V.I., Shelyakov A.V., Mostovaya K.S., Vysotina E.A. Layered Self-Healing Composite Material with an Internal Functional Layer Based on Borosiloxane // Inorganic Materials: Applied Research. 2020. Vol. 11. Pp. 1051–1059.

27. Патент 2710623 C1, Российская Федерация, МПК B32B5/00. Композиционный слоистый самозалечивающийся материал / Ситников Н.Н., Хабибулина И.А., Ризаханов Р.Н.; заявитель и патентообладатель ГНЦ РФ ФГУП «Центр им. М.В. Келдыша». № 2019111370; заявл. 16.04.2019, Бюл. № 1. 11 с.

28. Каприелов С.С., Гольденберг А.Л., Тамразян А.Г. О самозалечивании высокопрочного бетона, подвергнутого деструкции при циклическом замораживании // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2017. № 5(371). С. 56–61.

29. Solstiy S.V., Orlova N.L., Velichko A.S. Crack self-healing in clay-cement concrete diaphragm of embankment dam // Magazine of Civil Engineering. 2018. № 77(1). Pp. 3–12.

30. Chernykh T.N., Bondarenko S.A., Zimich V.V. Study of natural self-healing of materials based on inorganic binders. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering // International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety. 2020. Vol. 962. 0220402020.

31. Tolstoy A., Gridchin A., Glagolev E., Lesovik R., Shapovalov N. Efficient Construction Composites for Construction in the North and the Arctic // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 147. Pp. 15–22.

32. Bruyako M., Grigorieva L., Grigorieva A., Ivanova I. Treatment of natural zeolites for increasing the sorption capacity // Solid State Phenomena. 2016. Vol. 871. Pp. 70–75.

33. Bruyako M., Grigoryeva L. Bioactive additives for self-healing of concrete

microstructure // Materials Science Forum. 2018. Vol. 945 MSF. Pp. 36–41.

34. Bruyako M., Grigor'eva A., Stepina I., Golotenko D., Podsevalova A. Biomodified building materials on the base of mineral binders // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 7th International Scientific Conference on Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education. 2020. Vol. 1030. 012005.

35. Kalenov S.V., Gradova N.B., Sivkov S.P., Khokhlachev N.S., Panfilov V.I. A preparation based on bacteria isolated from hypersaline environments to improve the functional and protective characteristics of concrete // Biotekhnologiya. 2020. Vol. 36. № 4. Pp. 21–28.

36. Golovkina D.A., Zhurishkina E.V., Ivanova L.A., Baranchikov A.E., Sokolov A.Y., Bobrov K.S., Masharsky A.E., Tsvigun N.V., Kopitsa G.P., Kulminskaya A.A. Calcifying Bacteria Flexibility in Induction of CaCO₃ Mineralization. Life. 2002. Vol. 12. № 1. 317.

37. Namsaraev Z.B., Melnikova A.A., Rudenko A.P., Komova A.V. Processes of Nanosized Calcium Carbonate Formation by Microorganisms // Nanotechnologies in Russia. 2020. № 15. Pp. 20–27.

38. Strokova V.V., Dukhanina U.N., Balitsky D.A. Crack closure in a cement matrix using bacterial precipitation of calcium carbonate // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 95. Pp. 158–164.

39. Li L., Liu T., Jiang G., Fang C., Sun J., Zheng S., Liu H., Leusheva E., Morenov V., Nikolaev N. Field application of microbial self-healing cement slurry in Chunguang 17-14 well // Energies. 2021. Vol. 14(6). 1544.

40. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Indicators of the effectiveness of self-healing asphalt concrete // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. 02007.

41. Inozemtcev S.S., Do T.T. Sodium alginate application in self-healing technology for asphalt concrete. Environmental and Construction Engineering: Reality and the Future // Lecture Notes in Civil Engineering. Vol. 160. Pp. 59–65.

42. Inozemtcev S.S., Korolev E.V., Do T.T. Thermal and Mechanical Properties of Calcium Alginate Capsules for Self-Healing Asphalt Concrete // Materials Science Forum. 2021. Vol. 1041. Pp. 101–106.

43. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Technological features of production calcium-alginate microcapsules for self-healing asphalt // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 251. 01008.

44. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Sodium alginate emulsions for asphalt concrete modifiers encapsulating: structural rheological properties //

Magazine of Civil Engineering. 2021. № 101(1). 10104.

45. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Active polymeric reducing agent for self-healing asphalt concrete // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 1030. 012002.

46. Perelmutter M.N. Modeling of Crack Self-Healing Kinetics // Physical Mesomechanics. 2020. Vol. 23. № 4. Pp. 301–308.

47. Perelmutter M. Cracks self-healing – Physical and mathematical modeling // AIP Conference Proceedings. International Conference on Physical Mesomechanics. Materials with Multilevel Hierarchical Structure and Intelligent Manufacturing Technology. 2020. Vol. 231014. 020248.

48. Perelmutter M. Application of the bridged crack model for evaluation of materials repairing and self-healing. Journal of Physics: Conference Series // International Conference Problems of Mathematical Physics and Mathematical Modelling. 2017. Vol. 130. 0120396.

49. Иноземцев С.С., Королев Е.В., До Т.Ч. Перспективы использования метода акустической эмиссии для исследования самовосстанавливающихся асфальтобетонов. Технические науки: проблемы и решения // Сб. ст. по материалам XXX Международной научно-практической конференции «Технические науки: проблемы и решения». М.: Изд. «Интернаука», 2019. № 12(28). С. 157–164.

Информация об авторах

Иноземцев Сергей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Строительного материаловедения. E-mail: inozemtsevss@mail.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26.

До Тоан Чонг, аспирант кафедры Строительного материаловедения. E-mail: trongtoan007@gmail.com. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26.

Королев Евгений Валерьевич, доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе. E-mail: prorektor_nr@spbgasu.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4

Поступила 04.10.2021 г.

© Иноземцев С.С., До Т.Ч., Королев Е.В., 2022

^{1,*}Inozemtcev S.S., ¹Do T.T., ²Korolev E.V.

¹National Research Moscow State University of Civil Engineering

²Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

*E-mail: inozemtsevss@mail.ru

RUSSIAN EXPERIENCE OF RESEARCH IN THE FIELD OF BUILDING MATERIALS WITH THE FUNCTION OF SELF-HEALING

Abstract. The results of the analysis of scientific and technical literature, reflecting the experience of research of Russian scientists in the field of self-healing of building materials are shown. They are presented in publications included in international bibliographic and abstract databases. The tendency of changes in the number of publications over 10 years indicates an exponential growth in the interest of researchers in the ability of self-healing, most of the works (more than 50%) published in the field of materials science. The total number of publications by Russian authors over ten years devoted to self-healing is 206 works, of which 49% are in the field of materials science.

An analysis of articles in publications included in international bibliographic and abstract databases published by domestic authors shows that methods of creating a material structure, which contains additional elements in the form of a reserve volume of a structure-forming substance, are proposed to implement the self-healing effect. Such elements are capsules or functional layers with a reducing agent, the destruction of which triggers the recovery (healing) process. Works are presented where the recovery effect is achieved due to the binder's own potential, which is not fully realized at the initial stage of structure formation. The authors have proposed the implementation of the self-healing effect in composites based on a hydraulic mineral binder (cement) and an organic binder (bitumen) or polymer. At the same time, in most cases, there is no mathematical description of self-healing mechanisms.

Keywords: self-healing, concrete, asphalt concrete, capsules

REFERENCES

1. Lesovik V.S. Geonics (geomimetics) as a transdisciplinary area of research [Geonika (geomimetika) kak transdistsiplinarnoye napravleniye issledovaniy]. Higher education in Russia. 2014. No. 3. Pp. 77–83. (rus)
2. Elistratkin M.Y., Lesovik V.S., Alfimova N.I., Shurakov I.M. On the question of mix composition selection for construction 3d printing. Materials Science Forum. 2018. Vol. 945 MSF. Pp. 218–225.
3. Vatin N.I., Chumadova L.I., Goncharov I.S., Zykova V.V., Karpenya A.N., Kim A.A., Finashenkov E.A. 3D printing in construction [3D-pechat' v stroitel'stve]. Construction of unique buildings and structures. 2017. No. 1 (52). Pp. 27–46. (rus)
4. Makul N., Fediuk R., Amran M., Zeyad A.M., Murali G., Vatin N., Klyuev S., Ozbakkaloglu T., Vasilev Yu. Use of recycled concrete aggregates in production of green cement-based concrete composites: a review. Crystals. 2021. Vol. 11. 232.
5. Lesovik V.S., Strokova V.V. On the development of the scientific direction "Nanosystems in building materials science" [O razvitii nauchnogo napravleniya "Nanosistemy v stroitel'nom materialovedenii"]. Construction Materials. 2006. No. 9. Pp. 93–101. (rus)
6. Loganina V.I., Makarova L.V., Tarasov R.V., Davydova O.A. Optimization of the composition of composites for general construction purposes modified with nanoscale additives [Optimizatsiya sostava kompozitov obshchestroitel'nogo naznacheniya, modifitsirovannykh nanorazmernymi dobavkami]. Regional architecture and construction. 2010. No. 2. Pp. 53–57. (rus)
7. Loganina V.I., Ryzhov A.D. Structure and properties of synthesized additive based on amorphous aluminosilicates. Case Studies in Construction Materials. 2015. Vol. 3. Pp. 132–136.
8. Fediuk R.S., Lesovik V.S., Svintsov A.P., Mochalov A.V., Kulichkov S.V., Stoyushko N.Y., Gladkova N.A., Timokhin R.A. Self-compacting concrete using pretreated rice husk ash Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 3 (79). Pp. 66–76.
9. Makarov D.B., Krasnikova N.M., Morozov N.M., Ayupov D.A., Borovskikh I.V., Khokhryakov O.V., Yagund E.M., Khozin V.G. Improving the quality of materials for highway construction. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. No. 11. 3035.
10. Khozin V.G., Abdrakhmanova L.A., Nizamov R.K. General concentration regularity of the effects of nano-modification of building materials [Obshchaya kontsentratsionnaya zakonomernost' effektiv nanomodifitsirovaniya stroitel'nykh materialov]. Building materials. 2015. No. 2. Pp. 25–33. (rus)
11. Klyuev S.V., Klyuev A.V., Shorstova E.S. Fiber concrete for 3-d additive technologies. Materials Science Forum. 2019. Vol. 974. Pp. 367–372.
12. Tamrazyan A.G. Concrete and reinforced concrete: problems and prospects [Beton i zhelezobeton: problemy i perspektivy]. Industrial and civil construction. 2014. No. 7. Pp. 51–54. (rus)
13. Fediuk R., Amran M., Vatin N., Vasilev Y., Lesovik V., Ozbakkaloglu T. Acoustic properties of innovative concretes: a review. Materials. 2021. No. 14. 328.
14. Inozemtcev A.S., Korolev E.V. Features of the defectiveness of nanomodified high-strength lightweight concrete based on hollow microspheres. Key Engineering Materials. 2017. 743 KEM. Pp. 68–72.
15. Lesovik V., Ayzenshtadt A., Frolova M., Lesovik R., Strokova V. «Green» composites for north- arctic region development. Open Ecology Journal. 2014. Vol. 7. Pp. 32–36.
16. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Increasing the Weathering Resistance of Asphalt by Nanomodification. Materials Science Forum. 2019. Vol. 945. Pp. 147–157.
17. Kotlyarsky E.V., Gridchin A.M., Lesovik R.V. Factors contributing to the destruction of the structure of asphalt concrete during the operation of road asphalt concrete pavements [Fakty, sposobstvuyushchiye razrusheniyu struktury asfal'tobetona v protsesse ekspluatatsii dorozhnykh asfal'tobetonnykh pokrytiy]. Belgorod. 2012. 187 p. (rus)
18. Fediuk R., Kuzmin D., Cherneev A., Batarshin V., Garmashov I., Lesovik V., Ibragimov R. Concretes for underwater structures. Key Engineering Materials. 2018. Vol. 769 KEM. Pp. 3–8.
19. Nelyubova V.V., Strokova V.V., Sumin A.V., Jernovskiy I.V. the structure formation of the cellular concrete with nanostructured modifier. Key Engineering Materials. 2017. Vol. 729. Pp. 99–103.
20. Panchenko A.I., Kharchenko I.Ya., Vasilev S.V. Durability of concrete with compensated chemical shrinkage [Dolgovechnost' betonov s kompensirovannoy khimicheskoy usadkoy]. Construction Materials. 2019. No. 8. Pp. 48–53. (rus)
21. Startsev V.O., Nizina T.A. Prediction of climatic aging of epoxy polymers based on changes in color indicators [Prognozirovaniye klimaticheskogo stareniya epoksidnykh polimerov po izmeneniyu tsvetovykh pokazateley]. VIAM Proceedings. 2015. No. 12. 10. (rus)

22. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Review of road materials self-healing: problems and perspective. 2020. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 855. 012010.
23. Bazhenov Yu.M., Erofeev V.T., Salman A.D.S.D., Smirnov V.F., Fomichev V.T. Self-healing technology of reinforced concrete structures using microorganisms [Tekhnologiya samovostanovleniya zhelezobetonnykh konstruktsey s pomoshch'yu mikroorganizmov]. Russian engineer. 2018. Vol. 61. No. 4. Pp. 46–48.
24. Sitnikov N.N., Khabibullina I.A., Mashchenko V.I., Rizakhanov R.N. Prospects of Application of Self-Healing Materials and Technologies Based on Them. Inorganic Materials: Applied Research. 2018. Vol. 9. No. 5. Pp. 785–793.
25. Mashchenko V.I., Sitnikov N.N., Khabibullina I.A., Kuzmin M.K., Chausov D.N. Structure and properties of self-healing materials based on hydroxyl terminated polydimethylsiloxane and boric acid. Journal of Physics: Conference Series. International Interdisciplinary Scientific Conference on Advanced Element Base of Micro- and Nano-Electronics. 2002. Vol. 1560. 012037.
26. Sitnikov N.N., Khabibullina I.A., Mashchenko V.I., Shelyakov A.V., Mostovaya K.S., Vysotina E.A. Layered Self-Healing Composite Material with an Internal Functional Layer Based on Borosiloxane. Inorganic Materials: Applied Research. 2020. Vol. 11. Pp. 1051–1059.
27. Sitnikov N.N., Khabibullina I.A., Rizakhanov R.N. Composite laminated self-healing material. Patent RF, no 2710623 C1, 2019.
28. Kapielov S.S., Goldenberg A.E., Tamrazyan A.G. About self-healing high-strength concrete, underloaded destruction in cyclic freezing [Self-healing of high-strength concrete subjected to destruction by cyclic freezing]. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2017. No. 5 (371). Pp. 56–61. (rus)
29. Soltskiy S.V., Orlova N.L., Velichko A.S. Crack self-healing in clay-cement concrete diaphragm of embankment dam. Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 77(1). Pp. 3–12.
30. Chernykh T.N., Bondarenko S.A., Zimich V.V. Study of natural self-healing of materials based on inorganic binders. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Construction, Architecture and Technology Safety. 2020. Vol. 962. 0220402020.
31. Tolstoy A., Gridchin A., Glagolev E., Lesovik R., Shapovalov N. Efficient Construction Composites for Construction in the North and the Arctic. Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 147. Pp. 15–22.
32. Bruyako M., Grigorieva L., Grigorieva A., Ivanova I. Treatment of natural zeolites for increasing the sorption capacity. Solid State Phenomena. 2016. Vol. 871. Pp. 70–75.
33. Bruyako M., Grigoryeva L. Bioactive additives for self-healing of concrete microstructure. Materials Science Forum. 2018. Vol. 945 MSF. Pp. 36–41.
34. Bruyako M., Grigor'eva A., Stepina I., Golotenko D., Podsevalova A. Biomodified building materials on the base of mineral binders. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 7th International Scientific Conference on Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education. 2020. Vol. 1030. 012005.
35. Kalenov S.V., Gradova N.B., Sivkov S.P., Khokhlachev N.S., Panfilov V.I. A preparation based on bacteria isolated from hypersaline environments to improve the functional and protective characteristics of concrete. Biotehnologiya. 2020. Vol. 36. No. 4. Pp. 21–28.
36. Golovkina D.A., Zhurishkina E.V., Ivanova L.A., Baranchikov A.E., Sokolov A.Y., Bobrov K.S., Masharsky A.E., Tsvigun N.V., Koptsa G.P., Kulminskaya A.A. Calcifying Bacteria Flexibility in Induction of CaCO₃ Mineralization. Life. 2002. Vol. 12. No. 1. 317.
37. Namsaraev Z.B., Melnikova A.A., Rudenko A.P., Komova A.V. Processes of Nanosized Calcium Carbonate Formation by Microorganisms. Nanotechnologies in Russia. 2020. No. 15. Pp. 20–27.
38. Strokova V.V., Dukhanina N., Balitsky D.A. Crack closure in a cement matrix using bacterial precipitation of calcium carbonate. Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 95. Pp. 158–164.
39. Li L., Liu T., Jiang G., Fang C., Sun J., Zheng S., Liu H., Leusheva E., Morenov V., Nikolaev N. Field application of microbial self-healing cement slurry in Chunguang 17-14 well. Energies. 2021. Vol. 14(6). 1544.
40. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Indicators of the effectiveness of self-healing asphalt concrete. E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. 02007.
41. Inozemtcev S.S., Do T.T. Sodium alginate application in self-healing technology for asphalt concrete. Environmental and Construction Engineering: Reality and the Future. Lecture Notes in Civil Engineering. Vol. 160. Pp. 59–65.
42. Inozemtcev S.S., Korolev E.V., Do T.T. Thermal and Mechanical Properties of Calcium Alginate Capsules for Self-Healing Asphalt Concrete. Materials Science Forum. 2021. Vol. 1041. Pp. 101–106.

43. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Technological features of production calcium-alginate microcapsules for self-healing asphalt. MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 251. 01008.

44. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Sodium alginate emulsions for asphalt concrete modifiers encapsulating: structural rheological properties. Magazine of Civil Engineering. 2021. No. 101(1). 10104.

45. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Active polymeric reducing agent for self-healing asphalt concrete. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 1030. 012002.

46. Perelmuter M.N. Modeling of Crack Self-Healing Kinetics. Physical Mesomechanics. 2020. Vol. 23. No. 4. Pp. 301–308.

47. Perelmuter M. Cracks self-healing – Physical and mathematical modeling. AIP Conference Proceedings. International Conference on Physical

Mesomechanics. Materials with Multilevel Hierarchical Structure and Intelligent Manufacturing Technology. 2020. Vol. 231014. 020248.

48. Perelmuter M. Application of the bridged crack model for evaluation of materials repairing and self-healing. Journal of Physics: Conference Series. International Conference Problems of Mathematical Physics and Mathematical Modelling. 2017. Vol. 130. 0120396.

49. Inozemtsev S.S., Korolev E.V., Do T.T. Prospects for the use of the acoustic emission method for the study of self-healing asphalt concrete [Perspektivy ispol'zovaniya metoda akusticheskoy emissii dlya issledovaniya samovosstanavlivayushchikhsya asfal'tobetonov]. Technical sciences: problems and solutions: Sat. Art. based on the materials of the XXX International Scientific and Practical Conference "Engineering Sciences: Problems and Solutions.". M.: Ed. Internauka, 2019. No. 12 (28). Pp. 157–164. (rus)

Information about the authors

Inozemtcev, Sergey S. PhD. E-mail: inozemtsevss@mail.ru. National Research Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe hw., 26.

Do Toan T. Postgraduate student E-mail: trongtoan007@gmail.com. National Research Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe hw., 26.

Korolev, Evgeniy V. DSc, Professor. E-mail: prorektor_nr@spbgasu.ru. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, Saint-Peterburg, 2nd Krasnoarmeyskaya st., 4.

Received 04.10.2021

Для цитирования:

Иноземцев С.С., До Т.Ч., Королев Е.В. Отечественный опыт исследования в области строительных материалов с функцией самовосстановления // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 1. С. 8–22. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-2-8-22

For citation:

Inozemtcev S.S., Do T.T., Korolev E.V. Russian experience of research in the field of building materials with the function of self-healing. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 1. Pp. 8–22. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-2-8-22

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-23-30

Саламанова М.Ш.

Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика

Комплексный научно-исследовательский институт имени Х.И. Ибрагимова

Российской академии наук

E-mail: madina_salamanova@mail.ru.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВКИ АКТИВНОГО МИКРОКРЕМНЕЗЕМА НА СВОЙСТВА ВЯЖУЩИХ ЩЕЛОЧНОЙ АКТИВАЦИИ

Аннотация. Мировой опыт промышленного внедрения и уникальность свойств строительных щелочных композитов доказывают перспективность и актуальность развития бесклинкерной технологии. Разработка рецептур вяжущих связок щелочной активации на основе тонкодисперсных порошков алюмосиликатной природы позволит получать новые эффективные и качественные продукты. В работе исследовано влияние активного микрокремнезема на кинетику набора прочности, изменение плотности и порового пространства цементного камня, рецептурно-технологических факторов и условий твердения. Обоснованы химические превращения активного кремнезема в условиях щелочной среды, приводящие к изменениям водородного показателя. Методами электронной микроскопии развиты основы формирования структуры цементного камня на вяжущей связке «аспирационная пыль (60 %) – клинкерная пыль (40 %) – микрокремнезем – Na_2SiO_3 », фазовый состав характеризуется присутствием гидроалюмосиликатов натрия и кальция, кристаллических новообразований близких к ларниту и их гидратов, аморфной субстанции, сульфалюминатов кальция, гидроалюминатов кальция. Результаты исследований, на наш взгляд, безусловно представляют практическую значимость для строительной отрасли, так как предлагаемые рецептуры бесклинкерных цементов способны частично заменить дорогой и энергоемкий портландцемент, позволяя создавать прочные и долговечные бетонные и железобетонные конструкции.

Ключевые слова: бесклинкерные вяжущие, аспирационная пыль, клинкерная пыль щелочной активатор, метасиликат натрия, микрокремнезем

Введение. Производство портландцемента на мировом уровне в 2020 году достигло 4,1 млрд. тонн, и оно стремительно растет из года в год за счет развивающихся стран. Один только Китай в 2018 году произвел 2 370 млн. тонн или 57,6 % от мирового объема. Высокие показатели, а также высокие темпы роста производства демонстрируют Турция, Вьетнам и Индонезия, которые скорее всего в ближайшие 5 лет обойдут США.

Конечно, с одной стороны, это положительная тенденция, но, с другой возрастают объемы, выделяющегося при производстве цемента, углекислого газа. Установлено, что при обжиге 1 тонны портландцементного клинкера образуется 0,37 тонны углекислого газа в результате диссоциации карбоната кальция; в тоже время вырабатывается еще дополнительная порция около 0,35 тонн CO_2 при сжигании топлива и других технологических переделов. Мировая цементная промышленность занимает одно из лидирующих мест после электроэнергетики и транспорта по образованию парниковых газов (5–8 %). Расходуется огромное количество углекислоты, которое в течение миллиардов лет консервировалось в горных породах и минералах различного генезиса, что в итоге сказывается на экологической обстановке тропосферы [1–10, 15]. Поэтому ос-

новной проблемой исследователей является снижение выделяющейся углекислоты, которая образуется при производстве портландцемента.

Таким образом, чтобы предотвратить вредные выбросы в атмосферу и не навредить природной среде и человечеству, необходимо развивать новые перспективные направления решения обозначенных проблем, в том числе такие как разработка технологии бесклинкерных вяжущих щелочной активации (БВЩА), которые можно производить как на основе отходов топливно-энергетической промышленности при их наличии в конкретном регионе, так и с применением тонкодисперсных алюмосиликатных добавок техногенного или естественного генезиса.

Материалы и методы. В качестве минеральных добавок для разработки рецептур БВЩА исследовались отходы цементной промышленности, собранные из пылеочистных сооружений клинкерообжигательных вращающихся печей. Энергодисперсионный микроанализ исследуемых добавок проводили с помощью растрового электронного микроскопа Quanta 3D 200 i, который показал следующий оксидный состав:

– клинкерная пыль, %: MgO = 1,49; Al_2O_3 = 4,11; SiO_2 = 16,89; K_2O = 1,57; CaO = 71,64; Fe_2O_3 = 4,30.

– аспирационная пыль, %: $MgO = 0,97$; $Al_2O_3 = 4,68$; $SiO_2 = 20,31$; $K_2O = 6,43$; $CaO = 64,15$; $Fe_2O_3 = 3,47$.

Изучение физико-механических свойств цементного камня проводили по стандартным методикам ГОСТ 310.4-81 Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии. ГОСТ 12730.1-78 Бетоны. Методы определения плотности; испытание образцов осуществляли с помощью гидравлического пресса ИП-500. Для создания соответствующих условий хранения образцов были использованы: камеры пропарочная КУП-1 и нормального твердения КНТ-1.

В результате проведения исследований получены эффективные рецептуры вяжущих связок «аспираторная пыль (60 %) – клинкерная пыль (40 %) – микрокремнезем – Na_2SiO_3 », с использованием аспираторной ($S_{уд} = 280 \text{ м}^2/\text{кг}$) и клинкерной пыли ($S_{уд} = 210 \text{ м}^2/\text{кг}$) электрофильтров вращающихся печей, микрокремнезема ($S_{уд} = 1620 \text{ м}^2/\text{кг}$) Челябинского металлургического комбината, жидкого натриевого стекла с силикатным модулем 2,4 и плотностью $1,42 \text{ г/см}^3$. Следует отметить, что оптимальная дозировка

добавки активного микрокремнезема (МК) определялась экспериментальным путем, особенность МК заключается в том, что ультрадисперсные микросферы аморфизированного стекла с содержанием $SiO_2 = 98 \%$ и размерностью до $0,1 - 0,2 \text{ мкм}$, покрывают частицы составляющих вяжущей связки и заполнителя, создают пластифицирующий и уплотняющий эффекты, заполняя межзерновое пространство прочными новообразованиями и повышая адгезионную прочность [16].

Основная часть. Исследовалось влияние содержания добавки МК на прочность цементного камня на вяжущих связках «аспираторная пыль (60 %) – клинкерная пыль (40 %) – микрокремнезем – Na_2SiO_3 » в 28 суточном возрасте в зависимости от условий выдерживания; часть образцов после предварительного выдерживания в течение 10 часов подвергалась тепловлажностной обработке (ТВО) по режиму 3+4+2 при температуре изотермической выдержки 80°C , часть твердела в нормально-влажностных условиях (НВУ), на рисунке 1 приведены результаты испытаний.

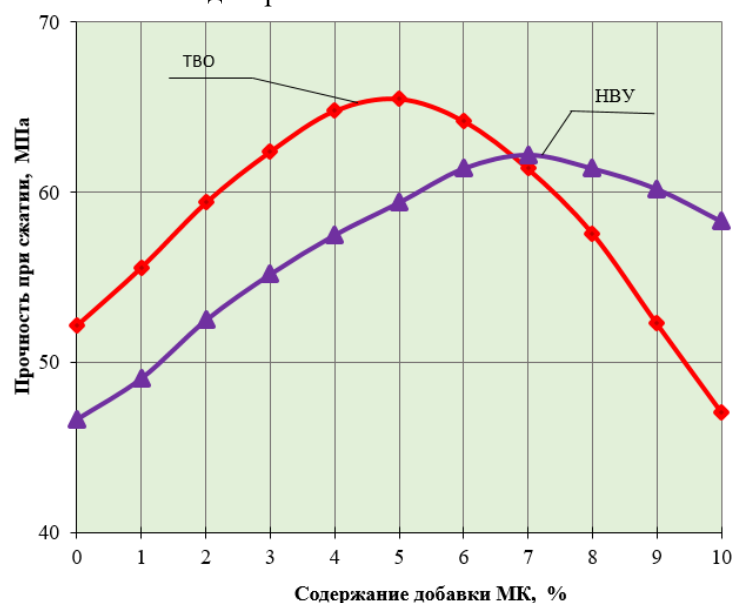


Рис. 1. Зависимость влияния содержания микрокремнезема на прочность цементного камня после ТВО и НВУ

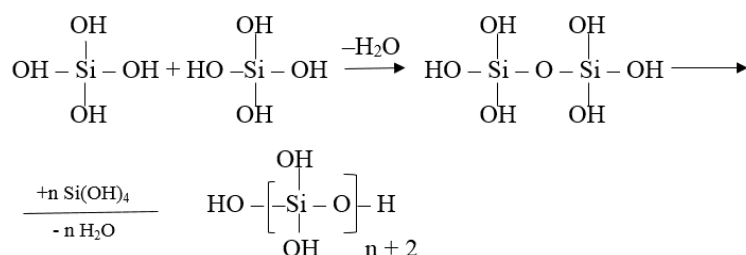
Введение добавки микрокремнезема по-разному отразилось на свойствах цементного камня на основе вяжущей связки из следующих компонентов «аспираторная пыль (60 %) – клинкерная пыль (40 %) – микрокремнезем – Na_2SiO_3 », тепловлажностная обработка благоприятна для набора прочности, при содержании добавки МК 5 % прочность увеличилась на 25,4 % и составила 65,7 МПа; твердение в нормально-влажностных условиях немного по-другому действует на прочность цементного камня, введение МК в дозировке 7 % способствовало достижению максимальной прочности 62,2 МПа,

что на 33,1 % повысило прочность в сравнении с контрольным образцом. Добавка микрокремнезема обладает упрочняющим действием, при дозировке 5 % в условия ТВО, и 7% при твердении в НВУ; после предварительной выдержки температура считается катализатором набора прочности.

Полученные результаты показали, что добавка МК – это активная минеральная добавка, обладающая пластифицирующим эффектом; высокая удельная поверхность частиц ферросилиция заполняет межзерновое пространство цементного камня, уплотняя его; связывает оксиды

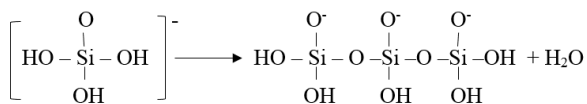
кальция и натрия с образованием трудно растворимых соединений типа гидросиликатов кальция и натрия; повышает растворимость аспирационной и клинкерной пыли.

Эффективность микрокремнезема проявляется только в определенных границах присутствия в составе системы и зависит от условий твердения образцов вяжущего, при твердении после ТВО этот диапазон 4–6 %, при НВУ выдерживания 6–8 %. В обоих случаях наблюдается равномерное снижение прочности при увеличении дозировки микрокремнезема выше обозначенных. Обоснованию этому служат химические превращения активного кремнезема в условиях высокого содержания этого вещества, приводящего к изменениям водородного показателя



Гель кремниевой кислоты имеет несколько ионизированных форм, которые изменяются в зависимости от pH среды, так если $\text{pH} < 8$ образуется H_4SiO_4 , при $\text{pH} = 11,5$ – SiO_4^{4-} [13, 14, 22, 23].

Реакция полимеризации мономерного аниона H_3SiO_4^- протекает в очень короткие сроки:



Микрокремнезем как было установлено является активной добавкой, состоящей на 96–98 % из аморфной составляющей, при увеличении дозировки поровое пространство твердеющей системы насыщается значительным количеством кремниевой кислоты, что приводит к снижению pH среды из-за кислотного оксида SiO_2 , в результате начинается поликонденсация ионов Si(OH)_6 и поры и капилляры цементного камня заняты слабо связанными коллоидным гелем из обводненного SiO_2 и именно это ухудшает свойства вяжущей связки при высоких дозировках МК. Визуально даже цвет образцов с высоким содержанием микрокремнезема изменяется, становясь сероватым.

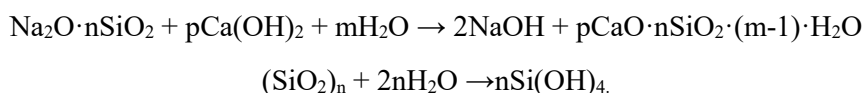
В случае если дозировка добавки МК ниже рекомендуемой межзерновое пространство со-

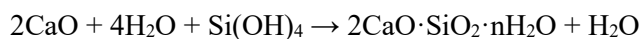
среды. Высокая щелочность среды системы вызывает быстрое диспергирование порошкообразных компонентов, и микрокремнезема в частности, а процессы протекающие в композиции можно описать уравнением: $(\text{SiO}_2)_n + 2n\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow n\text{Si(OH)}_4$.

В зависимости от водородного показателя среды диспергация кремнезема изменяется, при $\text{pH} < 8$ растворимость микрокремнезема – $2 \cdot 10^{-3}$ моль/л, а при $\text{pH} = 11$ она существенно увеличивается $50 \cdot 10^{-3}$ моль/л, и происходит это за счет выпадения в осадок нестабильной ортокремниевой кислоты Si(OH)_4 и ионов $(\text{Si(OH)}_6)^{2-}$. В результате преобразований при изменениях щелочности среды проходят цепные реакции поликонденсации, приводящие к сшиванию цепочек и образованию поликремниевой кислоты [17 – 21].

держит небольшое количество кремниевой кислоты, и это не особо влияет на pH среды, в результате реакций полимеризации не наблюдается, вяжущая система твердеет, образуя прочную структуру. При повышении дозировки МК в поровом пространстве увеличивается присутствие кремнезема SiO_2 , что способствует росту температуры в твердеющей системе, поэтому при ТВО количество добавки требуется меньшее, чем при НВУ.

Реакционная способность аспирационной пыли определяется как было установлено не только наличием стеклофазы и значением pH щелочной среды, но присутствием активных минеральных добавок, вступающих во взаимодействие с продуктами растворения аспирационных минералов с образованием в результате кристаллического сростка цементного камня. Добавка микрокремнезема и относится к такому типу веществам, она оказывает сильное воздействие на деструкцию алюмокремнекислородных цепочек и связывает их в результате $2\text{Na}^+ \leftrightarrow \text{Ca}^{2+}$ катионного обмена, оказывая стимулирующее действие. Также аморфная модификация кремнезема способна диспергироваться в растворе NaOH с образованием $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ силикатов натрия и сложных труднорастворимых соединений типа низкоосновных силикатов кальция:





Следовательно, повышение прочности в первые сроки твердения обусловлено именно физическим взаимодействием высокодисперсных частичек и их поверхностной энергии. На рисунке 2 приводятся результаты исследования

влияния добавки микрокремнезема на свойства модифицированного цементного камня: водонасыщение и плотность.

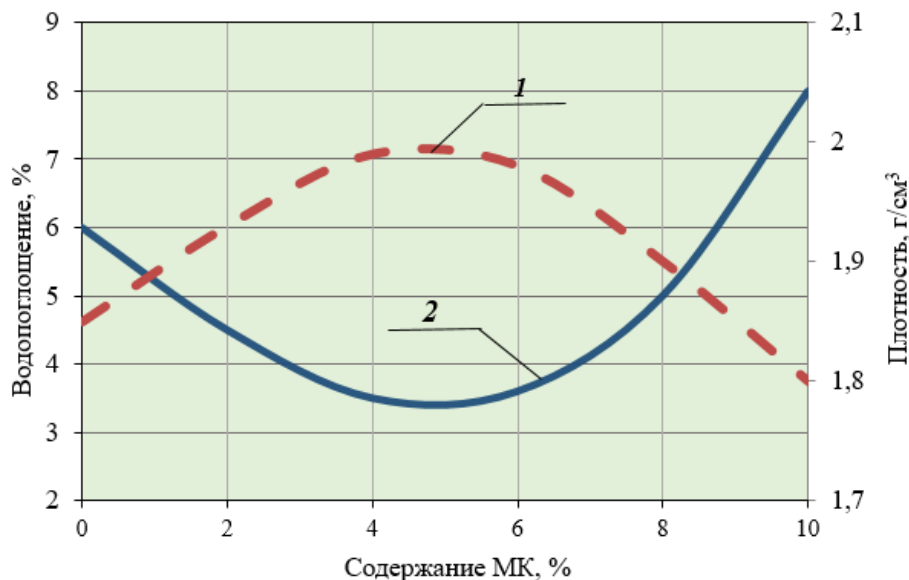


Рис. 2. Зависимости влияния МК на плотность (1) и водопоглощение (2) цементного камня после ТВО

Введение добавки МК в дозировке 5% снижает потребность в щелочном растворе, тем самым повышается плотность цементного камня после ТВО с 1,8 до 2,0 г/см³, водонасыщение уменьшается с 6,0 до 3,5%.

Для изучения процессов структурообразования цементного камня БВЩА проводились электронно-зондовые исследования на растровом

электронном микроскопе VEGA II LMU производства фирмы Tescan, системы энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 450/XT. Композиция на вяжущей связке «аспирационная пыль (60 %)– клинкерная пыль (40 %) – микрокремнезем (5 %) – Na_2SiO_3 » характеризуется массивной неоднородной структурой (рис. 3).

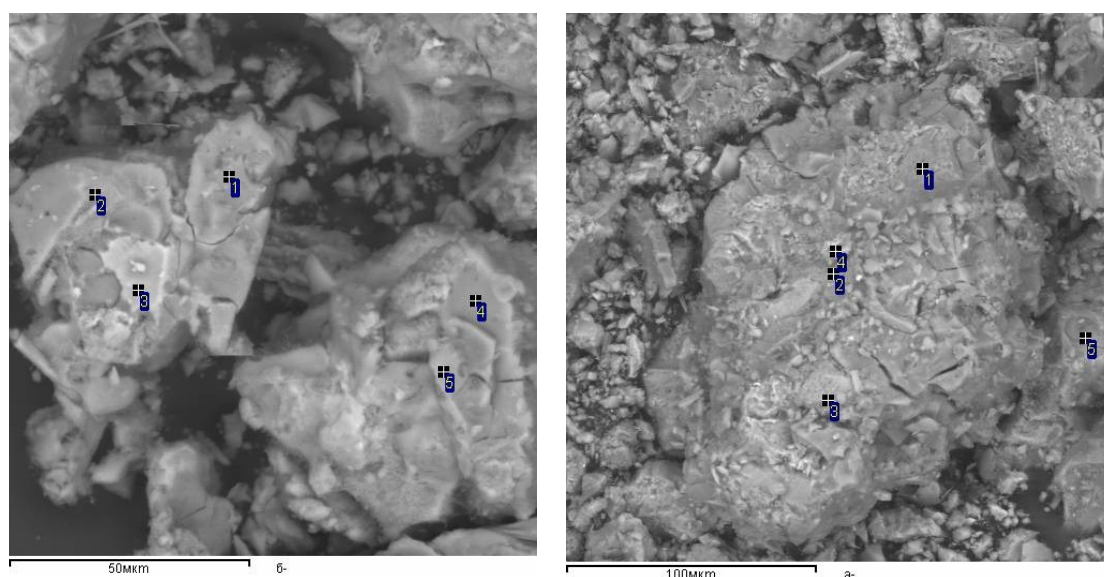


Рис. 3. Типичные агрегаты кристаллов кальциевых силикатов

В полостях, микротрещинах и межкристаллических пространствах развиты игольчатые

кристаллы (длиной до 200–300 мкм) сульфатно-минеральных, иногда срастающиеся в «войлочные»

агрегаты; в ассоциации присутствует тонковолокнистый гипс, пластинчатые кристаллы гидроалюминатов кальция. Химический состав варьирует в агрегатах с разными структурно-текстурными особенностями (таблица 1): присутствуют массивные скрытокристаллические агрегаты

алюмосиликатного состава (видимо, «наследующие» агрегаты исходной глинистой массы) и слагающие основную массу, раскристаллизованные трещиноватые агрегаты, сложенные гидратированными кальциевыми силикатам.

Таблица 1

**Результаты анализа агрегата кристаллов кальциевых силикатов
(участки анализа указаны на рисунке 3)**

спектр	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	FeO	Итог
1	–	–	2,68	9,45	–	64,97	8,94	85,90
2	–	–	1,80	11,56	–	55,05	16,66	85,00
3	0,58	1,15	3,73	25,47	–	60,10	2,99	94,00
4	0,54	0,51	3,09	22,07	0,48	56,82	6,16	89,60
5	-	1,82	2,50	31,94	–	53,31	1,77	91,20

Изучение процессов твердения и формирования структуры цементного камня на основе вяжущих щелочного затворения выявило схожесть их с гидратационными реакциями взаимодействия известково-кремнеземистых композиций [16–23]. Щелочи реагируют с диоксидом кремния по следующей схеме: в процессе кристаллизации гидроксид натрия, теряя влагу и образует кристаллогидраты, обволакивая зерна заполнителя, далее взаимодействует с углекислым газом по реакции: $2\text{NaOH} + \text{CO}_2 = \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O}$, параллельно связывает диоксид кремния по реакции: $2\text{NaOH} + n\text{SiO}_2 = \text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, в результате чего формируется связка щелочных гидросиликатов натрия или калия.

Выводы.

Анализ полученных результатов исследования подтвердил перспективность бесклинкерной технологии, вяжущие связки щелочного затворения позволят получать строительные композиты с заданными свойствами, не уступающими портландцементному бетону. Добавка активного микрокремнезема при дозировке 5–7 % создает благоприятные условия для получения прочного и долговечного искусственного камня. Электронно-зондовые исследования процессов структурообразования цементного камня на связках «аспирационная пыль (60 %)– клинкерная пыль (40 %) – микрокремнезем (5 %) – Na₂SiO₃» подтвердили присутствие агрегатов гидроалюмосиликатного состава, кристаллических новообразований близких к ларниту и их гидратов, аморфной субстанции, развитых игольчатых кристаллов сульфоалюминатов кальция, иногда срастающихся в «войлочные» агрегаты; пластинчатых кристаллов гидроалюминатов кальция.

Таким образом, полученные разработки внесут свой вклад в строительное материаловедение создавая новые композиты с меньшими энерго- и

ресурсозатратами и одновременно улучшая экологическую обстановку окружающей нас среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lopez F.J., Sugita S., Tagaya M., Kobayashi T. Metakaolin-Based Geopolymers for Targeted Adsorbents to Heavy Metal Ion Separation // Journal of Materials Science and Chemical Engineering. 2014. № 2. Pp. 16–27.
2. Муртазаев С.-А.Ю., Саламанова М.Ш., Нахаев М.Р. Возможные пути альтернативного решения проблем в цементной индустрии // Строительные материалы. 2020. № 1-2. С. 73–77.
3. Chen L., Wang Z., Wang Y. and Feng J. Preparation and Properties of Alkali Activated Metakaolin- Based Geopolymer // Materials. 2016. Vol. 9. 767.
4. Муртазаев С.-А.Ю., Саламанова М.Ш., Сайдумов М.С., Исмаилова З.Х. Влияние активных центров поверхности на реакционную способность минеральных добавок // Научный журнал «Современная наука и инновации» (Ставрополь – Пятигорск). 2017. №2 (18). С. 168–175.
5. Муртазаев С.-А.Ю., Саламанова М.Ш. Перспективы использования термоактивированного сырья алюмосиликатной природы // Приволжский научный журнал. 2018. №2 (Т.46). С. 65–70.
6. Murtazayev S-A. Yu., Salamanova M.Sh., Alashanov A., Ismailova Z. Features of Production of Fine Concretes Based on Clinkerless Binders of Alkaline Mixing // 14th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM 2019) Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, 23–27 September 2019. Belgorod. 2019. Pp. 385-388.
7. Zhang Z., Provis J.L., Zou J., Reid A., Wang H. Toward an indexing approach to evaluate fly ashes for geopolymer manufacture // Cement and Concrete Research. 2016. Pp. 163–173.

8. Рахимова Н.Р. Состояние и перспективные направления развития исследований и производства композиционных шлакощелочных вяжущих, растворов и бетонов // Строительные материалы. 2008. №9. С.77–80.
9. Hardjito D., Wallah S., Sumajouw D., Rangan B. On the development of fly ash-based geopolymer concrete // ACJ Materials Journal. 2004. Vol.101. Pp. 467–472.
10. Davidovitz J. Geopolymer. Chemistry and applications. Saint-Quentin: Institute Geopolymer. 2008. 592 pp.
11. Fadhil Nuruddin M., Demie S., Fareed Ahmed M., Nasir Shafiq Effect of Superplasticizer and NaOH molarity on workability, compressive strength and Microstructure Properties of Self-Compacting Geopolymer Concrete // World Academy of Science, Engineering and Technology. 2011. № 75. Pp. 908–914.
12. Рахимова Н.Р., Рахимов Р.З. Композиционные шлакощелочные вяжущие с минеральными добавками различного типа активности // Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. 2013. № 16. С. 204 – 216.
13. Villa C., Pecina E.T., Torres R., Gomez L. Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite // Construction and Building Materials. 2010. Vol. 24. Pp. 2084 – 2090.
14. Alex T.C., Nath S.K., Kumar S., Kalinkin A.M., Gurevich B.I., Kalinkina E.V., Tyukavkina V.V. Utilization of zinc slag through geopolymerization: influence of milling atmosphere // International Journal of Mineral Processing. 2013. Vol. 216. Pp. 102 – 107.
15. Murtazayev S- A. Yu., Salamanova M.Sh., Mintsaeв M.Sh., Bisultanov R.G Fine-Grained Concretes with Clinker-Free Binders on an Alkali Gauging // Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol.1. Pp.500 – 503.
16. Bataev D.K-S., S-A. Yu. Murtazayev, Salamanova M.Sh., Viskhanov S.S. Utilization of Cement Kiln Dust in Production of Alkali-Activated Clinker-Free Binders // Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol. 1. Pp. 457–460.
17. Рахимов М.М., Хабибуллина Н.Р., Рахимов Р.З. Механизм отверждения боратных солевых растворов шлакощелочными вяжущими // Цемент и его применение. 2016. № 3. С. 96–99.
18. Dombrowski K. The Influence of Calcium Content on the Structure and Thermal Performance of Fly Ash Based Geopolymers // Journal of Materials Science. Vol. 42. №. 9. 2007. Pp. 3033–3043.
19. Pawlasova S., F. Skvara High-Temperature Properties of Geopolymer Materials // Akali Activated Materials. 2008. Pp. 523–525.
20. Khater H.M. Effect of firing temperatures on alkali activated Geopolymer mortar doped with MWCNT // Advances in Nano Research. 2015. Vol. 3. №. 4. Pp. 225–242.
21. Khater H.M., El Nagar A.M., Ezzat M. Optimization of Alkali Activated Grog/Ceramic Wastes Geopolymer Bricks // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. 2016. Vol. 5. Issue 1. Pp. 37–46.
22. Nagajothi S., Elavenil S. Strength assessment of geopolymer concrete using M-sand // Int. J. Chem. Sci. 2016. № 14(Vol.1). Pp. 115–126.
23. Саламанова М.Ш., Нахаев М.Р., Исмаилова З.Х. Закономерности протекания процессов формирования структуры и прочности бесклнкерного вяжущего щелочной активации // Международный научно-исследовательский журнал «Строительные материалы и изделия». 2020. Т.3. №1. С. 21–29.

Информация об авторах

Саламанова Мадина Шахидовна, кандидат технических наук, доцент, директор научно-технического центра коллективного пользования «Современные строительные материалы и технологии». E-mail: madina_salamanova@mail.ru. Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад. М.Д. Миллионщикова. Россия, 364051, Грозный, пр. Исаева, 100.

Поступила 25.09.2021 г.

© Саламанова М.Ш., 2022

Salamanova M.Sh.

Grozny State Oil Technical University named after acad. M.D. Millionshchikov

Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences

E-mail: madina_salamanova@mail.ru

THE INFLUENCE OF ACTIVE MICROSILICA ADDITIVE ON BINDING PROPERTIES OF ALKALINE ACTIVATION

Abstract. *The world experience of implementation and the uniqueness of building alkaline composites prove the prospects and relevance of the development of clinker-free technology. The development of formulations of alkaline activation binders based on fine powders of aluminosilicate nature will allow obtaining new effective and high-quality products. The paper investigates the effect of active microsilica on the kinetics of strength gain, changes in density and pore space of cement stone, formulation and technological factors and hardening conditions. The chemical transformations of active silica under alkaline conditions, leading to changes in the pH value, have been substantiated. By electron microscopy, the foundations of the formation of the structure of a cement stone on a binding bond "aspiration dust (60 %) – clinker dust (40 %) – microsilica – Na_2SiO_3 " amorphous substance, calcium sulfoaluminates, calcium hydroaluminates are developed. According to authors, the research results are important for the construction industry, since the proposed formulations of clinker-free cements can replace expensive and energy-intensive Portland cement, making it possible to create strong and durable concrete and reinforced concrete structures.*

Keywords: *clinker-free binders, aspiration dust, clinker dust, alkaline activator, sodium metasilicate, silica fume*

REFERENCES

1. Lopez F.J., Sugita S., Tagaya M., Kobayashi T. Metakaolin-Based Geopolymers for Targeted Adsorbents to Heavy Metal Ion Separation. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. 2014. No. 2. Pp. 16 – 27.
2. Murtazaev S.-A.Yu., Salamanova M.Sh., Nahaev M.R. Possible ways of alternative solutions to problems in the cement industry [Vozmozhnye puti al'ternativnogo resheniya problem v cementnoj industrii]. *Construction Materials*. 2020. No. 1-2. Pp. 73–77. (rus)
3. Chen L., Wang Z., Wang Y. and Feng J. Preparation and Properties of Alkali Activated Metakaolin-Based Geopolymer. *Materials*. 2016. Vol. 9. 767.
4. Murtazaev S.-A.Yu., Salamanova M.Sh., Saidumov M.S., Ismailova Z.Kh. Influence of active centers of the surface on the reactivity of mineral additives [Vliyanie aktivnykh centrov poverhnosti na reakcionnuyu sposobnost' mineral'nykh dobavok]. *Scientific journal "Modern Science and Innovations" (Stavropol - Pyatigorsk)*. 2017. No. 2 (18). Pp. 168–175. (rus)
5. Murtazaev S.-A.Yu., Salamanova M.Sh. Prospects for the use of thermally activated raw materials of aluminosilicate nature [Perspektivy ispol'zovaniya termoaktivirovannogo syr'ya al'yumosilikatnoj prirody]. *Privolzhsky scientific journal*. 2018. No.2 (Vol.46). Pp. 65–70. (rus)
6. Murtazayev S.-A. Yu., Salamanova M.Sh., Alashanov A., Ismailova Z. Features of Production of Fine Concretes Based on Clinkerless Binders of Alkaline Mixing. 14th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM 2019) Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, 23–27 September 2019. Belgorod. 2019. Pp. 385–388.
7. Zhang Z., Provis J.L., Zou J., Reid A., Wang H. Toward an indexing approach to evaluate fly ashes for geopolymer manufacture. *Cement and Concrete Research*. 2016. Pp. 163–173.
8. Rakhimova N.R. State and promising directions of development of research and production of composite slag-alkaline binders, mortars and concretes [Sostoyanie i perspektivnye napravleniya razvitiya issledovaniy i proizvodstva kompozitsionnykh shlakoshchelochnykh vyazhushchih, rastvorov i betonov] *Construction Materials*. 2008. No.9. Pp. 77–80. (rus)
9. Hardjito D., Wallah S., Sumajouw D., Rangan B. On the development of fly ash-based geopolymer concrete. *ACI Materials Journal*. 2004. Vol.101. Pp. 467–472.
10. Davidovitz J. Geopolymer. Chemistry and applications. Saint-Quentin: Institute Geopolymer. 2008. 592 p.
11. Fadhil Nuruddin M., Demie S., Fareed Ahmed M., Nasir Shafiq Effect of Superplasticizer and NaOH molarity on workability, compressive strength and Microstructure Properties of Self-Compacting Geopolymer Concrete. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2011. No 75. Pp. 908–914.
12. Rakhimova N.R., Rakhimov R.Z. Composite slag-alkali binders with mineral additives of various types of activity [Kompozitsionnye shlakoshchelochnye vyazhushchie s mineral'nymi dobavkami razlichnogo tipa aktivnosti]. *Bulletin of the Volga*

Regional Branch of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences. 2013. No.16. Pp. 204–216. (rus)

13. Villa C., Pecina E.T., Torres R., Gomez L. Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite. Construction and Building Materials. 2010. Vol. 24. Pp. 2084–2090.

14. Alex T.C., Nath S.K., Kumar S., Kalinkin A.M., Gurevich B.I., Kalinkina E.V., Tyukavkina V.V. Utilization of zinc slag through geopolymerization: influence of milling atmosphere. International Journal of Mineral Processing. 2013. Vol. 216. Pp. 102–107.

15. Murtazayev S- A. Yu., Salamanova M.Sh., Mintsaeв M.Sh., Bisultanov R.G Fine-Grained Concretes with Clinker-Free Binders on an Alkali Gauging. Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol.1. Pp. 500–503.

16. Bataev D.K-S., S- A. Yu. Murtazayev, Salamanova M.Sh., Viskhanov S.S. Utilization of Cement Kiln Dust in Production of Alkali-Activated Clinker-Free Binders. Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol.1. Pp. 457–460.

17. Rakhimov M.M., Khabibullina N.R., Rakhimov R.Z. Curing mechanism of borate salt so-

lutions with slag-alkaline binders [Mekhanizm otverzhdeniya boratnyh solevykh rastvorov shlakoshche-lochnymi vyazhushchimi]. Cement and its application. 2016. No.3. Pp. 96 – 99. (rus)

18. Dombrowski K. The Influence of Calcium Content on the Structure and Thermal Performance of Fly Ash Based Geopolymers. Journal of Materials Science. Vol. 42. No. 9. 2007. Pp. 3033 – 3043.

19. Pawlasova S., F. Skvara High-Temperature Properties of Geopolymer Materials. Akali Activated Materials. 2008. Pp. 523 – 525.

20. Khater H.M. Effect of firing temperatures on alkali activated Geopolymer mortar doped with MWCNT. Advances in Nano Research. 2015. Vol. 3. No. 4. Pp. 225 – 242.

21. Khater H.M., El Nagar A.M., Ezzat M. Optimization of Alkali Activated Grog/Ceramic Wastes Geopolymer Bricks. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. 2016. Vol. 5. Issue 1. Pp. 37– 46.

22. Nagajothi S., Elavenil S. Strength assessment of geopolymer concrete using M-sand. Int. J. Chem. Sci. 2016. No 14 (Vol. 1). Pp. 115 – 126.

23. Salamanova M.Sh., Nakhaev M.R., Ismailova Z.Kh. Regularities of the processes of formation of the structure and strength of the linker-free binder alkaline activation [Zakonomernosti protekaniya processov formirovaniya struktury i prochnosti besklinkernogo vyazhushchego shche-lochnoj aktivacii]. International research journal "Building materials and products". 2020. Vol.3. No.1. Pp. 21–29. (rus)

Information about the authors

Salamanova, Madina S. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Scientific and Technical Center for Collective Use "Modern Building Materials and Technologies". E-mail: madina_salamanova@mail.ru. Grozny State Oil Technical University named after acad. M.D. Millionshchikova. Russia, 364051, Grozny, Isaeva Ave., 100.

Received 25.09.2021

Для цитирования:

Саламанова М.Ш. Исследование влияния добавки активного микрокремнезема на свойства вяжущих щелочной активации // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 1. С. 23–30. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-23-30

For citation:

Salamanova M.Sh. The influence of active microsilica additive on binding properties of alkaline activation. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 1. Pp. 23–30. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-23-30

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-31-43

Романовский С.А.

Полоцкий государственный университет

E-mail: s.romanovskiy@psu.by

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ ПЛИТ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОН РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Аннотация. В статье представлены результаты исследований, доказывающие эффективность применения теплоизоляционных плит, содержащих в качестве структурообразующего материала очесы льна.

Приведены сведения о натурных испытаниях в конструкции стенового ограждения с вентилируемой системой утепления эксплуатируемого одноэтажного жилого дома и исследований эксплуатационно-технологических характеристик теплоизоляционных материалов из льняных очесов. На основе экспериментальных данных рассчитаны значения сопротивления теплопередачи стенового ограждения при температуре воздуха от -2°C до -19°C и построены зависимости распределения влаги по толще теплоизоляционного слоя. По итогам испытаний установлено, что при эксплуатации наружного стенового ограждения с вентилируемой системой утепления влажность теплоизоляционного материала на основе очесов льна составляет 15,5 % и при температуре наружного воздуха -19°C обладает близким с теплоизоляционной плитой «Акотерм флакс» сопротивлением теплопередачи, равным $3,04 (\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})/\text{Вт}$. Изучение технологических характеристик показали, что утеплитель из льняных очесов может разрезаться, распиливаться и монтироваться к стеновому ограждению с помощью дюбель-гвоздей. Проведенные испытания на огнестойкость выявили, что теплоизоляционные плиты на основе очесов льна не воспламеняются под воздействием огня, а происходит вытлевание волокон очесов. Материал относится к группе горючих Г4 и обладает малой дымообразующей способностью.

В результате исследований обосновано рациональное применение льняных очесов для производства теплоизоляционных плит.

Ключевые слова: льняные очесы, утеплитель, влажность, термическое сопротивление теплопередаче, огнестойкость.

Введение. Отрасль строительных материалов в настоящее время ориентируется на создание новых эффективных утеплителей, что обусловлено стратегией энергосбережения в условиях повышения цен на энергетические ресурсы [1]. Развитие экологического «зеленого» строительства за последние годы в значительной степени изменило самосознание многих застройщиков и теперь наряду с традиционными показателями качества к возводимым зданиям часто предъявляют требования по экологической безопасности объектов. Необходимо отметить, что строительная отрасль как в Беларуси, так и в других странах не всегда готова обеспечить экологические требования заказчиков. В первую очередь данная проблема связана с ограниченным наличием и выпуском экологически чистых строительных материалов. Наибольшие проблемы производственного сектора связаны с изготовлением теплоизоляционных материалов, так как традиционные утеплители (пенополистирол и минеральная вата) не отвечают требованиям по экологии. При этом, кроме экологического аспекта у данных материалов имеются и другие существенные недостатки: наличие в составе вредных веществ; отсутствие технологии утилизации полученных отходов при производстве и после

эксплуатации теплоизоляции, а также изначально высокие энергетические затраты на производство [2].

В странах с большими запасами древесины, в т. ч. и в России ведутся исследования по разработке утеплителей на основе древесных волокон и различных связующих, таких как биоклей [3], поливинилацетатный клей [4], парафиновая эмульсия [5], а также без связующего с применением антисептика и антипирена [6]. При плотности $30\text{--}250 \text{ кг/м}^3$ теплоизоляционные материалы обладают теплопроводностью от $0,041 \text{ Вт/(м} \cdot ^{\circ}\text{C)}$ до $0,06 \text{ Вт/(м} \cdot ^{\circ}\text{C)}$ [7].

Составы плит для изготовления утеплителей на основе вторичной волокнистой массы из тарного картона или фибриллизованной бумажной макулатуры разработаны в Красноярске [8, 9]. Теплопроводность материалов составляет от $0,038\text{--}0,051 \text{ Вт/(м} \cdot ^{\circ}\text{C)}$ при плотности от 30 до 70 кг/м^3 .

Наиболее известным решением по применению переработанной макулатуры для производства утеплителя является эковата, состоящая на 80 % из волокнистого заполнителя и на 20 % из антипиренов. Теплоизоляционный материал

имеет плотность 30–75 кг/м³, обеспечивая теплопроводность 0,032–0,041 Вт/(м·°C) и паропроницаемость 0,3 мг/(м·ч·Па) [7, 10, 11].

Возможность применения волокон эвкалипта в виде заполнителя для утеплителя исследовали в Чили [12]. Связующим являлась фенольная смола. Теплоизоляционный материал при средней плотности от 80 кг/м³ до 250 кг/м³ обеспечивает теплопроводность 0,05–0,07 Вт/(м·°C).

В Вест-Индском университете разработан состав утеплителя на основе банановых волокон. Теплоизоляционный материал обладает теплопроводностью 0,041 Вт/(м·°C) при плотности 71 кг/м³ [13].

К инновационной разработке относится утеплитель на основе мха-сфагнума и жидкого стекла [14]. Теплопроводность материала равна 0,034–0,04 Вт/(м·K) при плотности 155–170 кг/м³. Однако, теплоизоляционные плиты имеют недостаток – усадочные деформации материала в процессе сушки. Для устранения данной проблемы предложено вводить дроблёную солому в количестве 20–30 % от массы мха. Новый теплоизоляционный материал обладает теплопроводностью 0,044–0,046 Вт/(м·°C), обеспечивает прочность на сжатие 0,2–0,21 МПа при средней плотности 156–190 кг/м³ [1, 15].

Существенным резервом в производстве местных теплоизоляционных строительных материалов являются волокнистые заполнители сельскохозяйственного происхождения. На основе конопли в Германии выпускают плиты «Thermo-Hanf» [16, 17]. Утеплитель включает следующие компоненты: 83–87 % волокнистый заполнитель, 10–12 % полиэстер, 3–5 % сода, применяемая в качестве антипирена. При средней плотности 35–40 кг/м³ теплоизоляционный материал обладает коэффициентом теплопроводности 0,038–0,04 Вт/(м·°C) [1].

Значительный интерес для стран центральной Азии представляет утеплитель из отходов хлопкового производства и натриевого жидкого стекла. При варьировании плотности в пределах 40–100 кг/м³ теплопроводность плит изменяется от 0,037 до 0,041 Вт/(м·°C) [18]. В условиях относительной влажности воздуха 60–70 % влажность теплоизоляционного материала равна 11–12 % [19].

В Технологическом университете PETRONAS изучали возможность использования волокон коры масличной пальмы в качестве структурообразующего материала утеплителя [20]. По результатам испытаний установлено, что при варьировании плотности от 66 кг/м³ до 110 кг/м³ коэффициент теплопроводности материала изменяется в пределах 0,03–0,09 Вт/(м·°C).

Исследования по получению теплоизоляционных плит из волокон коры масличной пальмы длиной до 4 см и натриевого жидкого стекла проводились в Полоцком государственном университете. Для повышения водостойкости связующего применялись добавки из извести и гипса [21]. Теплоизоляционный материал имеет плотность 135–168 кг/м³, обеспечивая теплопроводность 0,046–0,047 Вт/(м·°C) и прочность на сжатие при 10 % линейной деформации 0,2–0,24 МПа [7]. Омечается высокая стойкость волокон к гниению при относительной влажности воздуха 97 %.

Экологический утеплитель из льняных волокон «Экотеплин» производят в России. Заполнителем в теплоизоляционных плитах являются льняные волокна. В качестве связующего используется крахмал [2]. Соли бора добавляются для улучшения огнезащиты и предотвращения образования плесени и грибков. Материал имеет следующие показатели: средняя плотность 32–34 кг/м³, теплопроводность 0,038–0,04 Вт/(м·°C), коэффициент звукопоглощения 0,74–0,98, паропроницаемость 0,403 мг/м·ч·Па, группа горючести Г1 [7, 22].

В Беларуси выпускают теплоизоляционные плиты торговой марки «Акотерм флакс» [23]. Утеплитель содержит 85 % льняных волокон и 15 % полиэфирных волокон. Коэффициент теплопроводности материала соответствует 0,038–0,04 Вт/(м·°C), паропроницаемость равна 0,4 мг/м·ч·Па, звукопоглощение составляет 0,98 при средней плотности 30 кг/м³.

В настоящее время в лабораториях кафедры строительного производства Полоцкого университета производятся комплексные исследования по разработке теплоизоляционных плит со структурообразующим материалом из льняных очесов [1, 7, 24]. Проведенные исследования подтверждают возможность применения теплоизоляционных материалов в качестве утеплителя для зданий и сооружений. Однако, окончательную эффективность плит возможно подтвердить только прямыми натурными испытаниями материалов в конструкциях эксплуатируемых зданий с постоянной фиксацией основных теплофизических характеристик и мониторингом общего состояния [25]. В альтернативных исследованиях применяли экспериментальный утеплитель из волокон льна и теплоизоляционные плиты «Акотерм флакс». Использование очесов льна для изготовления теплоизоляционных материалов решает проблему утилизации растительных отходов льнопереработки, расширяет номенклатуру эффективных волокнистых утеплителей и обеспечивает получение полностью экологически безопасного материала [1].

Методология. Образцы на основе волокон и очесов льна изготавливали, соблюдая определенную последовательность выполнения технологических операций. Предварительно производили дозировку компонентов. Для получения модифицированного вяжущего в жидкое стекло сначала вводили известь и перемешивали до однородной консистенции, а затем добавляли гипс. После распределения модифицированного жидкого

стекла по поверхности волокон структурообразующего материала и формовки образцы утеплителей выдерживали в форме 6 часов при температуре 20 ± 2 °С, а затем высушивали в течение 4 часов в сушильном шкафу при температуре 45–55 °С. Образцы на основе смеси льняных и полиэфирных волокон вырезали из плит «Акотерм флакс» [24]. Структура исследуемых материалов представлена на рисунке 1.



Рис. 1. Структура теплоизоляционных материалов
а – из очесов льна, б – из волокон льна, в – из смеси льняных и полиэфирных волокон

Натурные исследования в условиях эксплуатации проводились на наружном стеновом ограждении с вентилируемой системой утепления.

На рисунке 2 приведена схема расположения термопар и датчиков теплового потока в стеновой конструкции с экспериментальными утеплителями.

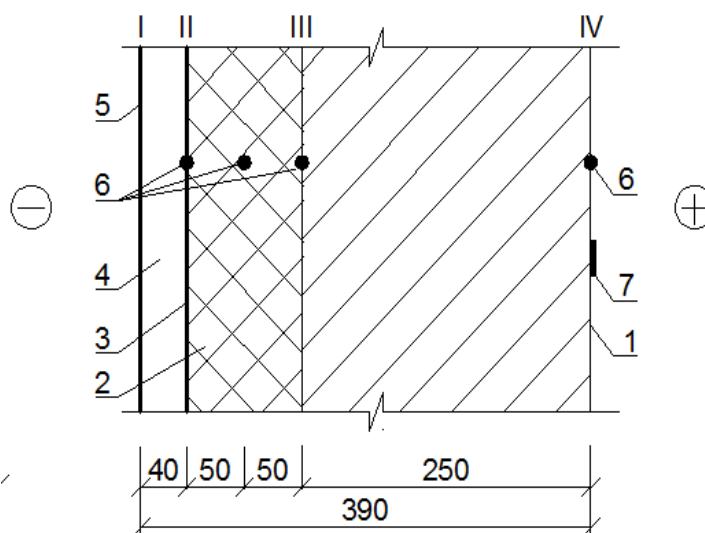


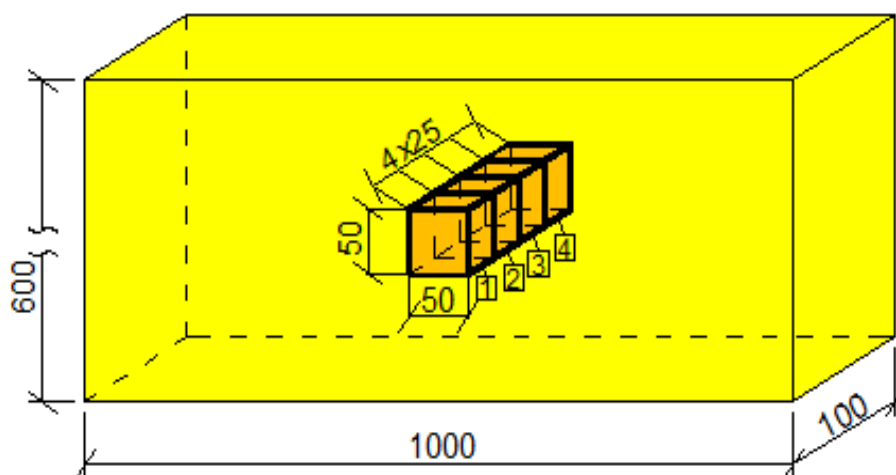
Рис. 2. Схема расположения термопар и датчиков тепловых потоков по сечению наружной стены с вентилируемой системой утепления
1 – керамический полнотелый кирпич; 2 – утеплитель; 3 – гидроветрозащитная мембрана;
4 – воздушная прослойка; 5 слой – стальной лист; 6 – термопара; 7 – датчик теплового потока
I, II, III, IV – границы слоев ограждения

Образцы из очесов или волокон льна изготавливали в виде плит размером $1000 \times 500 \times 100$ мм. Конструкция стенового ограждения включала в себя кирпичную кладку, теплоизоляцион-

ный материал из льняных очесов (стена 1), волокон льна (стена 2) и смеси льняных и полиэфирных волокон (стена 3), гидроветрозащитную мембрану, воздушную прослойку и стальной отделочный лист вентфасада. Теплофизические

свойства наружного ограждения определяли, применяя информационно-измерительный комплекс РТП-1-16Т.

Влажность утеплителей после испытаний в условиях эксплуатации определяли в соответствии с ГОСТ 17177. Схема выборки образцов представлена на рис. 3.



1, 2, 3, 4 - номера образцов-фрагментов

Рис. 3. Схема выборки образцов из теплоизоляционных плит

Предварительно по толще теплоизоляционных материалов вырезали образцы-призмы размером 50×50×100 мм. Образец-призму по поперечному сечению разрезали на отдельные фрагменты длиной 25 мм. Далее каждый образец-фрагмент взвешивали и помещали в сушильный шкаф. По достижении постоянной массы образцы снова взвешивали. Влажность определяли по величине изменения массы фрагментов до и после сушки [1].

Основная часть. В осенне-весенние периоды на протяжении 2018–2020 годов фиксировались изменения теплофизических процессов, происходящих в конструкции стенового ограждения одноэтажного жилого дома. Количественный состав, плотность и теплопроводность теплоизоляционных плит в сухом состоянии представлены в таблице 1 [24].

Таблица 1

Количественный состав, плотность и теплопроводность теплоизоляционных плит

№ состава	Расход компонентов на 1 м ³ , кг						Средняя плотность, кг/м ³	Теплопроводность, Вт/(м ² ·°С)
	волокно льна	очесы льна	жидкое стекло	полиэфирное волокно	известь	гипс		
1	–	90	9	–	0,5	0,5	100	0,038
2	90	–	9	–	0,5	0,5	100	0,045
3	29	–	–	5	–	–	34	0,04

Низкая плотность образцов «Акотерм флакс» обусловлена применяемой технологией структурообразования при формовке утеплителя, не позволяющий изготавливать материал более высокой плотности.

Для примера рассмотрен натурный эксперимент в период с 4 по 13 января 2019 года, в течение 10 суток, с наиболее низкими ночными температурами наружного воздуха на территории Полоцкого района Витебской области (Беларусь). По результатам измерений установлено,

что распределение температур для теплоизоляционных плит из смеси льняных и полиэфирных волокон практически совпадает с утеплителями из очесов льна, поэтому на рисунке 4 представлены только графики распределения температур по толщине стеновых ограждающих конструкций с теплоизоляционными плитами из очесов и волокон льна. Значения температур приняты как средние величины показаний температур с 21 часа вечера до 7 часов утра.

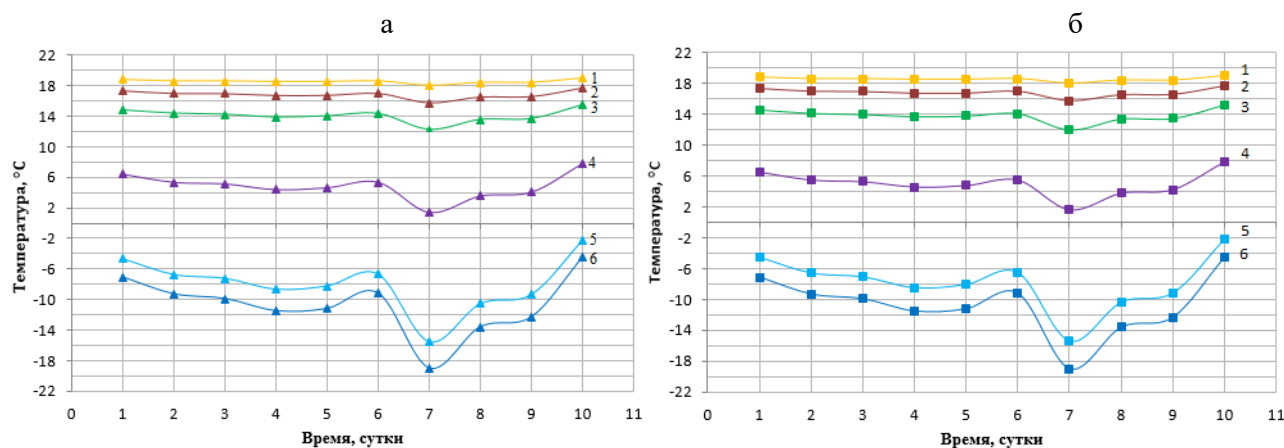


Рис. 4. Распределение температуры по толщине наружного стенового ограждения с вентилируемой системой утепления

- а – стена 1; б – стена 2; 1 – температура воздуха в помещении, °С;
 2 – температура поверхности кирпичной кладки на границе I, °С;
 3 – температура поверхности теплоизоляционного материала на границе II, °С;
 4 – температура в середине теплоизоляционного материала, °С;
 5 – температура поверхности теплоизоляционного материала на границе III, °С;
 6 – температура наружного воздуха, °С

Из графиков распределения температур (рис. 4) установлено, что наиболее холодными являются ночные часы седьмых суток. Амплитуда температур на поверхностях стенового ограждения с теплоизоляционными плитами из очесов льна в ночные часы седьмых суток составляет 31,3 °С, что практически совпадает со значением стены 2, равным 29,8 °С и идентично с

показателем стенового ограждения 3. На основании графиков (рис. 4) в таблице 2 приведены средние значения распределения температур в жилом помещении, стеновом ограждении и наружного воздуха за рассматриваемый временной период.

Таблица 2

Средние показатели температур

Показатель	Стена 1	Стена 2	Стена 3
Температура наружного воздуха, °С	-10,8	-10,8	-10,8
Температура поверхности утеплителя на границе II, °С	-8	-7,1	-7,9
Температура в середине теплоизоляционного материала, °С	4,8	-4,1	-4,6
Температура поверхности теплоизоляционного материала на границе III, °С	14,1	13,2	14
Температура поверхности кирпичной кладки на границе IV, °С	16,9	16,3	16,7
Температура воздуха в помещении, °С	18,5	18,5	18,5

Анализ представленных данных таблицы 2 показывает, что для стены 1 средняя температура поверхности кирпичной кладки на границе IV за 10 суток выше на 0,6 °С, чем для стенового ограждения с теплоизоляционным материалом на основе льняных волокон и идентично ограждению с плитой «Акотерм флакс». При сравнении средних показателей температур поверхности утеплителя на границе III за 10 суток установлено, что для наружного ограждения с материалом из очесов льна значение средней температуры выше на 0,8 °С, чем для стенового ограждения с теплоизоляционной плитой на основе льняных волокон и практически совпадает с показателем стены 3. За аналогичный период времени средняя температура утеплителя стены 1 на

0,7 °С ниже, чем у теплоизоляционного материала стены 2 и идентично значению плиты стены 3. Величина средней температуры ограждения с утеплителем из очесов за 10 суток на поверхности теплоизоляционного материала со стороны улицы не отличается от показателя стены с плитой состава 3 (табл. 1) и на 0,9 °С ниже, чем у стенового ограждения с материалом на основе льняных волокон.

Основываясь на полученных показателях плотностей тепловых потоков определены термические сопротивления теплопередачи конструкции стенового ограждения в зависимости от температуры наружного воздуха (рис. 5).

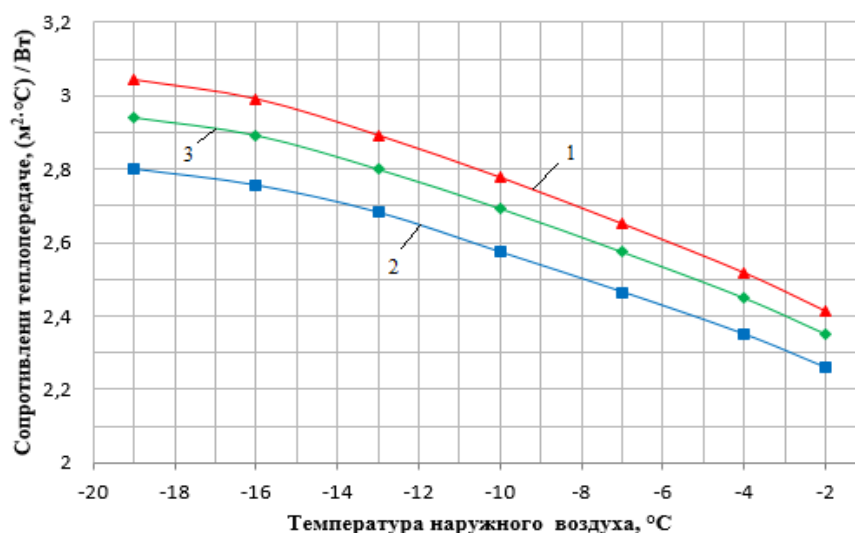


Рис. 5. Сопротивления теплопередачи стенового ограждения в зависимости от температуры наружного воздуха
Стеновое ограждение с утеплителем: 1 – из очесов льна, 2 – из волокон льна, 3 – из смеси льняных и полиэфирных волокон

Из зависимостей, представленных на рисунке 5 следует, что значение термического сопротивления стеновых ограждений с экспериментальными плитами при температуре наружного воздуха -2°С изменяется в пределах 2,26–2,41 ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С} / \text{Вт}$). При температуре воздуха -19°С термическое сопротивление стены 1 соответствует 3,04 ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С} / \text{Вт}$), что на 0,24 ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С} / \text{Вт}$) больше величины термического сопротивления теплопередачи стенового ограждения с плитами (состав 2, табл. 1). Показатель ограждения, содержащий утеплитель «Акотерм флакс» имеет близкое значение с сопротивлением теплопередачи стены 1 и равен 2,95 ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С} / \text{Вт}$). Изменение значения термического сопротивления стены с теплоизоляционными плитами из очесов с 2,41 ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С} / \text{Вт}$) до 3,04 ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С} / \text{Вт}$) при понижении температуры наружного воздуха до -19°С свидетельствует об эффективной работе теплоизоляционных материалов на основе льняных очесов.

Наиболее высокие значения сопротивления теплопередачи образцов из очесов льна достигаются за счет разнонаправленного расположения хаотично ориентированных элементарных волокон в структуре утеплителя, препятствующего конвективному переносу воздуха в результате уменьшения размеров тонких воздушных прослоек неправильной формы и их частичной локализации в виде отдельных замкнутых микропустот [7].

По окончании проведения мониторинга определены значения влажности теплоизоляционных материалов. Изменения показателя влажности по структуре теплоизоляционных плит представлены на рисунке 6. На основании полученных

данных установлена средняя величина влажности материала из очесов льна, равная 15,5 %. Полученное значение для состава 1 (табл. 1) ниже показателя влажности плиты из волокон на 16 % и больше на 20 % величины утеплителя из смеси льняных и полиэфирных волокон, соответствующие 18,4 % и 12,9 % соответственно. Влажность образца-фрагмента 1 теплоизоляционного материала из очесов на 12 % меньше показателя утеплителя (состав 2, табл. 1), равного 19,8 % и на 19 % выше, чем у плиты «Акотерм флакс». Максимальное количество влаги содержится в образцах-фрагментах 2. Так, влажность материала на основе очесов льна достигает 17,5 %, что на 13 % ниже влажности утеплителя из льняных волокон и на 19 % превышает значение плиты на основе льняных и полиэфирных волокон. Следует отметить, что участок наибольшего увлажнения образцов-фрагментов 2 по сравнению с фрагментами 1 связан с вертикальной циркуляцией воздуха вдоль наружной поверхности плит, способствующей испарению влаги из поверхностных слоев утеплителя. Влажность фрагмента 4 теплоизоляционного материала из очесов относительно фрагмента 2 уменьшается до 12,2%, что на 21% выше аналогичного показателя утеплителя «Акотерм флакс» и на 20 % ниже значения плиты на основе волокон льна.

Снижение показателя влажности в материале (состав 3, табл. 1) относительно значений плит на основе льняных очесов обусловлено присутствием в утеплителе «Акотерм флакс» полиэфирных волокон, приводящих к снижению поглощенной материалом влаги из воздуха относительно очесов.

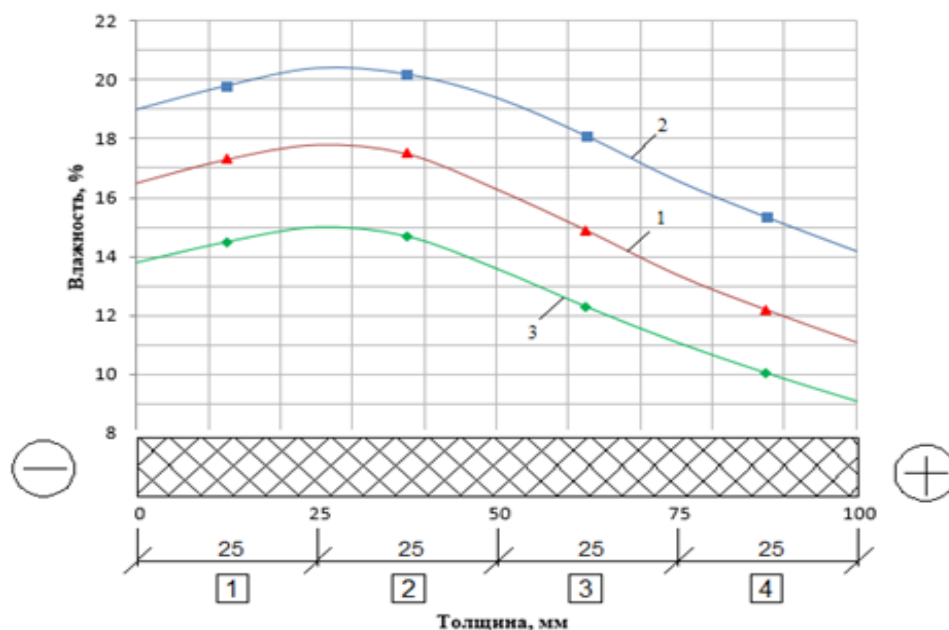


Рис. 6. — Распределение влажности в теплоизоляционных плитах

1, 2, 3, 4 — фрагменты в образцах-призмах

1 — утеплитель из очесов льна; 2 — утеплитель из волокон льна;
3 — утеплитель из смеси льняных и полиэфирных волокон

На данный момент теплоизоляционные плиты в наружном стеновом ограждении с вентилируемой системой утепления функционирует 3 года. В процессе постоянно ведущегося мониторинга биоповреждений и смещений теплоизоляционных материалов не наблюдается.

После исследования физических показателей теплоизоляционных плит в натурных условиях выполнены эксперименты по определению технологических характеристик утеплителей на основе льняных очесов. Проведены испытания по нарезке и распиливанию утеплителя различными видами режущего и пилящего инструмента, так как при укладке или монтаже теплоизоляцион-

ного материала существует необходимость в доборных элементах или в подрезке плит. Экспериментальные образцы размером 1000×500×100 мм подвергались разрезке в поперечном направлении. Внешний вид полученных разрезов и распилов показал, что утеплитель на основе очесов льна одинаково хорошо режется ножом с острым лезвием (рис. 7), а также пиляется угловой шлифмашиной и циркулярной пилой. К положительным характеристикам теплоизоляционного материала из льняных очесов относится отсутствие пыли в виде мелких частиц утеплителя во время резки или распиливания. Грани по разрезу имеют сплошную поверхность без видимых повреждений структуры утеплителя (рис. 8).



Рис. 7. Разрезание ножом плиты из очесов в поперечном направлении



Рис. 8. Поперечный разрез плиты

При устройстве вентилируемого фасада монтаж теплоизоляционных плит производится при помощи дюбель-гвоздей. Тип, длина и расположение дюбелей определяется в зависимости от толщины материала и состояния утепляемой стены.

Плотность плит из льняных очесов позволяет получать отверстия для дюбель-гвоздей используя стальной или полимерный заостренный стержень необходимого диаметра без нарушения структуры плиты вокруг отверстия. На рисунке 9 показан

монтаж утеплителя к кирпичной стене для проведения натурных испытаний образцов-плит при

устройстве вентилируемой системы фасада здания жилого дома.



Рис. 9. Монтаж утеплителя на кирпичной стене

Способность материала сопротивляться воздействиям огня при пожаре в течении определенного времени является одной из важнейшей эксплуатационной характеристикой теплоизоляционных плит. Испытания на огнестойкость проводили на фрагментах плит размером $500 \times 190 \times 100$ мм. В процессе проведения испытания по определению огнестойкости образцов на основе очесов, утеплитель в течении 30 минут непрерывно подвергался прямому воздействию огня (рис. 10). Теплоизоляционный материал в результате воздействия открытого пламени не воспламенялся, а происходило вытлевание под влиянием

высоких температур. При осмотре материала после устранения открытого пламени установлено, что в зоне воздействия огня произошло вытлевание волокон на глубину 80 мм. Диаметр вытлевающего участка составил 6 см (рис. 11). Необходимо отметить, что после устранения источника огня утеплитель не горел, но наблюдалось медленное тление материала на протяжении 4 часов, в результате чего большая часть материала подверглась разрушению. В процессе тления плиты дымообразования не наблюдалось.



Рис. 10. Воздействие огня на плиту из очесов во время испытания

Для сравнения проведены испытания по определению огнестойкости теплоизоляционных плит «Акотерм флакс», имеющих группу горючести Г4. В процессе эксперимента под воздействием открытого огня в течении 3 минут верхняя часть образца утеплителя из льняных и полиэфирных волокон воспламенилась и сгорела



Рис. 11. Внешний вид плиты в момент устранения открытого пламени

(рис. 12). Затем газовую горелку затушили, но теплоизоляционные плиты продолжали самостоятельно гореть и тлеть с выделением едкого дыма по причине присутствия в составе утеплителя полиэфирных волокон. Образец теплоизоляционной плиты марки «Акотерм флакс» полностью сгорел за 27 минут.



Рис. 12. Воздействие огня на плиту из льняных и полиэфирных волокон

Отсутствие процесса самостоятельного горения (поддержания пламени) для теплоизоляционного материала из очесов льна объясняется наличием в составе утеплителя связующего в виде модифицированного натриевого жидкого стекла. При изготовлении плит на стадии перемешивания компонентов вяжущее образует сплошную оболочку вокруг волокон льняных очесов, препятствующую возгоранию волокнистого структурообразующего материала при воздействии огня. При повышении температуры стекловидный слой жидкого стекла трансформируется в пористую структуру в результате вспучивания с дальнейшим переходом в вязко-текучее состояние.

Испытания по определению группы горючести и дымообразующей способности утеплителя на основе очесов проводили в Гродненском областном управлении МЧС Республики Беларусь. По результатам испытаний в соответствии с протоколом № 101 от 02.09.2019 года плиты теплоизоляционные из льняных очесов относятся к группе горючести Г4 и к группе материалов с малой дымообразующей способностью Д1. В протоколе отмечается, что материал самостоятельно не горит, а продолжительность самостоятельного тления составляет 6,5 часов.

Эксперимент на огнестойкость позволил установить, что теплоизоляционные плиты имеют отличия в механизмах деструктивных процессов, происходящих в волокнистой структуре утеплителей при воздействии огня. В результате утеплитель из очесов льна, имеющий такой же показатель горючести, как и плиты «Акотерм флак», является более безопасным для здоровья человека в случае возникновения пожара в здании.

Выводы. По итогам проведенных испытаний установлена эффективность использования теплоизоляционных плит из очесов в стеновом ограждении с вентилируемой системой утепления. В сухом состоянии коэффициент теплопроводности теплоизоляционного материала на основе льняных очесов равен $0,038 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$. При эксплуатации стенового ограждения утеплитель из очесов льна имеет показатель влажности, равный 15,5 % и обеспечивает при температуре наружного воздуха -19°C сопротивление теплопередачи $3,04 (\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$. Аналогичные стеновые конструкции с теплоизоляционными материалами на основе волокон льна и смеси льняных и полиэфирных волокон по сопротивлению теплопередачи приближаются к установленному значению стены с утеплителями из очесов льна.

Проведенные исследования теплоизоляционных плит из очесов льна показали, что утеплитель одинаково хорошо разрезается ножом с острым лезвием, а также пилится угловой шлифмашиной и циркулярной пилой. Монтаж теплоизоляционного материала к стеновому ограждению может производиться при помощи дюбель-гвоздей. Отверстия для дюбелей в утеплителе возможно выполнять при помощи заостренного стального или полимерного стержня необходимого диаметра.

В процессе исследования установлено, что теплоизоляционный материал на основе льняных очесов относится к группе горючести Г4 и обладает коэффициентом дымообразования Д1. Воздействие открытого пламени не вызывает возгорания утеплителя, происходит только вытлевание волокон очесов утеплителя в течении длительного периода времени.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бакатович А.А., Романовский С.А. Степень влияния факторов на основные физико-механические показатели теплоизоляционных плит из очесов // Вест. Полоцкого гос. ун-та. Серия F, Прикладные науки. Строительство. 2018. № 16. С. 87–92.
2. Лучинин С.Г., Кожухов В.А., Алашкевич Ю.Д. Использование вторичного целлюлозного

волокна в производстве теплозвукоизоляционных материалов // Решетневские чтения. 2017. Том 2. С. 147–148.

3. Стрикун В.В., Баяднин М.А., Намятов А.В., Ермолин В.Н. Получение теплоизоляционного материала из древесного волокна на основе биоклея // Актуальные проблемы лесного хозяйства. 2017. № 48. С. 86–87.

4. Ермолина А.В., Миронов П.В., Бывшев А.В. Получение теплоизоляционного плитного материала на основе древесного волокна // Актуальная проблема лесного комплекса. 2010. № 25. С. 186–189.

5. Журавлева Л.Н., Журавлева А.Н. Мягкие древесноволокнистые плиты – теплоизоляционный материал // Вестник КрасГАУ. 2010. № 11. С. 181–184.

6. Пат. 2149148, Российская Федерация. Теплоизоляционный материал / Бирюков В.И., Данилов В.В., Пашков Н.М. Заявл. 06.03.98. Оpubл. 20.05.00.

7. Бакатович А.А., Романовский С.А. Применение микроскопического анализа для оценки перспективы использования очесов волокна льна в производстве теплоизоляционного материала // Вест. Полоцкого гос. ун-та. Серия F, Прикладные науки. Строительство. 2017. № 8. С. 14–18.

8. Лучинкин С.Г., Кожухов В.А., Алашкевич Ю.Д. Получение теплоизоляционных материалов на основе вторичного целлюлозного волокна // ИВУЗ. Лесной журнал. 2017. № 6. С. 151–155.

9. Ермолина А.В., Миронов П.В. Получение и свойства теплоизоляционного материала на основе вторичной волокнистой массы // ИВУЗ. Лесной журнал. 2011. № 4. С. 109–114.

10. Горегляд С.Ю. Экологически чистые материалы для строительства // Строительные материалы. 1996. № 4. С. 5–6.

11. Иванов Г.В. Новый экологически чистый теплоизоляционный материал – эковата // Строительные материалы. 1995. № 1. С. 21.

12. Bialosau A., Bakatovich A. Materiais compostos para isolamento termico de materias primas naturais e aglutinantes minerais // Livro de Resumos 30 Congresso Luso – Brasileiro de Materiais de construcao sustentaveis. Coimbra, Portugal. 2018. Pp. 16–27.

13. Manohar K., Adeyanju A. A Comparison of Banana Fiber Thermal Insulation with Conventional Building Thermal Insulation // British Journal of Applied Science & Technology. 2016. № 17 (3). Pp. 1–9.

14. Бакатович А.А. Микроструктура как основной критерий, определяющий использование мха сфагнома в качестве заполнителя для эффек-

тивного плитного теплоизоляционного материала // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. F, Строительство. Прикладные науки. 2017. № 8. С. 42–46.

15. Becerra C., Montory J. A new biobased composite material using bark fibres eucalyptus // The 13 th pacific rim bio-based composites symposium «Bio-based composites for a sustainable future, Chile. 2016. Pp. 46–50.

16. Якунина Е.А. Современные теплоизоляционные материалы, как одна из тенденций экологического строительства // Синергия наук. 2018. № 24. С. 625–634.

17. Богатова Т.В., Двойцына А.И. Преимущества и особенности безопасных природных утеплителей // Инженерные сети и сооружения. 2016. № 3–4 (24–25). С. 14–19.

18. Rozyev M., Bakatovich A. Thermal insulation material, using waste cotton production as a placeholder // XI Junior Researchers Conference. European & national dimension in research. Architecture and civil engineering. Polotsk state University. Novopolotsk, PSU, 2019. № 11. Pp. 64–66.

19. Бакатович, А.А., Розьев М.А. Теплоизоляционный материал на заполнителе из отходов переработки хлопкового волокна // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. F, Строительство. Прикладные науки. 2019. № 8. С. 29–33.

20. Hassan S., Tesfamichael A., Mohd Nor M. Comparison study of thermal insulation characteristics from oil palm fibre // MATEC Web of Conferences. ICPER 2014 - 4 th International Conference on Production, Energy and Reliability. 2014. № 13. P. 5.

21. Romanovskiy S., Bakatovich A. Insulating material on the basis of bark fibre of the olive palm tree // European and National Dimension in Research: IX Junior Researchers Conference, Novopolotsk, April 26–27, 2017: in 3 p. Polotsk stage University. Novopolotsk, PSU. 2017. P. 3. Pp. 104–107.

22. Советников Д.О., Семашкина Д.О., Баранова Д.В. Оптимальная толщина утеплителя наружной стены для создания энергоэффективного и экологичного здания в условиях Санкт-Петербурга // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. № 12 (51). С. 7–19.

23. ТУ ВУ 391129716.001-2015. Плиты теплоизоляционные звукопоглощающие. Технические условия. Введ. 27.07.2015. Ореховск. 2015. 10 с.

24. Бакатович А.А., Романовский С.А. Особенности влияния влажности на теплопроводность волокнистого теплоизоляционного материала из очесов льна // Материалы II международной научной конференции «Образование. Транспорт. Инновации. Строительство». г. Омск, 18-19

апреля 2019 г. Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет. 2019. С. 432–439.

25. Давыденко Н.В. Теплоизоляционные плиты на основе отходов растениеводства и неорганического вяжущего // дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.05. 2016. 104 с.

Информация об авторах

Романовский Сергей Александрович, ассистент кафедры строительного производства. E-mail: s.romanovskiy@psu.by. Полоцкий государственный университет. Республика Беларусь, 211446, Новополоцк, ул. Блохина, д. 29.

Поступила 18.05.2021 г.

© Романовский С.А., 2022

Romanovskiy S.A.
Polotsk state university
E-mail: s.romanovskiy@psu.by

EXPERIENCE OF APPLICATION OF HEAT-INSULATING PLATES BASED ON PLANT FIBERS

Abstract. The article presents the results of studies proving the effectiveness of the use of heat-insulation plates containing noil of flax as a structure-forming material.

Information on field tests in the construction of a wall enclosure with a ventilated insulation system of an operated one-story residential building and studies of the operational and technological characteristics of heat-insulating materials made of flax fiber is presented. On the basis of experimental data, the values of the heat transfer resistance of the wall enclosure are calculated at an air temperature of -2°C to -19°C . The dependences of the distribution of moisture over the thickness of the heat-insulating layer are constructed. The test results shows that during the operation of an external wall fence with a ventilated insulation system, the moisture content of the heat-insulating material based on noils of flax is 15.5 %. The outside air temperature of -19°C it has a heat transfer resistance similar to that of the Acoterm Flax heat-insulating plate, equal to $3,04 (\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})/\text{W}$. The study of technological characteristics shows that flax noils insulation can be cut, sawn and mounted to a wall fence using dowel-nails. The fire resistance tests carried out shows that the heat-insulating plates based on flax fibers do not ignite under the influence of fire, but the fibers of the noils are pulled out. The material belongs to the G4 combustible group and has a low smoke-generating ability.

As a result of the research, the rational use of flax noils for the production of heat-insulating boards has been substantiated.

Keywords: flax noils, heater, humidity, thermal resistance of heat transfer, fire resistance.

REFERENCES

1. Bakatovich A.A., Romanovskiy S.A. The degree of influence of factors on the main physical and mechanical indicators of heat-insulating slabs from fleece [Stepen' vliyaniya faktorov na osnovnye fiziko-mekhanicheskie pokazateli teploizolyatsionnykh plit iz ochesov]. Herald of Polotsk State University. Ser. F, Civil engineering. Applied sciences. 2018. No. 16. Pp. 87–92.
2. Luchinin S.G., Kozhukhov V.A., Alashkevich Yu.D. The use of recycled cellulose fiber in the production of heat and sound insulation materials [Ispol'zovanie vtorichnogo tsellyuloznogo volokna v proizvodstve teplozvukoizolyatsionnykh materialov]. Reshetnev readings. 2017. Vol. 2. Pp. 147–148.
3. Strikun V.V., Bayadnin M.A., Namyatov A.V., Ermolin V.N. Obtaining heat-insulating material from wood fiber based on bio-adhesive [Poluchenie teploizolyatsionnogo materiala iz drevesnogo volokna na osnove biokleya]. Actual problems of forestry. 2017. No. 48. Pp. 86–87.
4. Ermolina A.V., Mironov P.V., Byvshev A.V. Obtaining heat-insulating board material based on wood fiber [Poluchenie teploizolyatsionnogo plitnogo materiala na osnove drevesnogo volokna]. Actual problems of forestry. 2010. No. 25. Pp. 186–189.
5. Zhuravleva L.N., Zhuravleva A.N. Soft fibreboard - thermal insulation material [Myagkie drevesnovoloknistye plity – teploizolyatsionnyy material] KrasGAU Bulletin. 2010. No 11. Pp. 181–184.
6. Beryukov V.I., Danilov V.V., Pashkov N.M. Heat insulating material. Patent RF, no 2149148, 2000
7. Bakatovich A.A., Romanovskiy S.A. Application of microscopic analysis to assess the prospects for the use of flax fibers in the production of heat-insulating material [Primenenie mikroskopicheskogo analiza dlya otsenki perspektivy

ispol'zovaniya ochesov volokna l'na v proizvodstve teploizolyatsionnogo materiala]. Herald of Polotsk State University. Ser. F, Civil engineering. Applied sciences. 2017. No. 8. Pp. 14–18.

8. Luchinkin S.G., Kozhukhov V.A., Alashkevich Yu.D. Obtaining heat-insulating materials based on recycled cellulose fiber [Poluchenie teploizolyatsionnykh materialov na osnove vtorichnogo tsellyuloznogo volokna]. IVUZ. Forest Journal. 2017. No. 6. Pp. 151–155.

9. Ermolina A.V., Mironov P.V. [Obtaining and properties of heat-insulating material based on recycled fiber mass]. IVUZ. Forest Journal. 2011. No. 4. Pp. 109–114.

10. Goreglyad S. Yu. Environmentally friendly building materials [Ekologicheski chistye materialy dlya stroitel'stva]. Construction Materials. 1996. No. 4. Pp. 5–6.

11. Ivanov G.V. New environmentally friendly heat-insulating material – ecowool [Novyy ekologicheski chistyy teploizolyatsionnyy material – ekovata] Construction Materials. 1995. No. 1. P. 21.

12. Bialosau A., Bakatovich A. Materiais compostos para isolamento termico de materias primas naturais e aglutinantes minerais. Livro de Resumos 30 Congresso Luso – Brasileiro de Materiais de construcao sustentaveis. Coimbra, Portugal. 2018. Pp. 16–27.

13. Manohar K., Adeyanju A. A Comparison of Banana Fiber Thermal Insulation with Conventional Building Thermal Insulation. British Journal of Applied Science & Technology. 2016. No. 17 (3). Pp. 1–9.

14. Bakatovich, A.A. Microstructure as the main criterion for the use of sphagnum moss as a filler for an effective plate heat-insulating material [Mikrostruktura kak osnovnoy kriteriy, opredelyayushchiy ispol'zovanie mkha sfagnuma v kachestve zapolnitelya dlya effektivnogo plitnogo teploizolyatsionnogo materiala]. Herald of Polotsk State University. Ser. F, Civil engineering. Applied sciences. 2017. No. 8. Pp. 42–46.

15. Becerra C., Montory J. A new biobased composite material using bark fibres eucalyptus // The 13 th pacific rim bio-based composites symposium «Bio-based composites for a sustainable future, Chile. 2016. Pp. 46–50.

16. Yakunina E.A. Modern thermal insulation materials as one of the green building trends [Sovremennyye teploizolyatsionnyye materialy, kak odna iz tendentsiy ekologicheskogo stroitel'stva]. Synergy of Sciences. 2018. No. 24. Pp. 625–634.

17. Bogatova T.V., Dvoytsyna A.I. Advantages and features of safe natural insulation [Preimush-

chestva i osobennosti bezopasnykh prirodnykh uteplyteley]. Engineering networks and structures. 2016. No 3–4 (24–25). Pp. 14–19.

18. Rozyev M., Bakatovich A. Thermal insulation material, using waste cotton production as a placeholder. XI Junior Researchers Conference. European & national dimension in research. Architecture and civil engineering. Polotsk state University. Novopolotsk, PSU, 2019. No. 11. Pp. 64–66.

19. Bakatovich A.A., Rozyev M.A. Heat-insulating material based on cotton fiber waste [Teploizolyatsionnyy material na zapolnitelye iz otkhodov pererabotki khlopkovogo volokna]. Herald of Polotsk State University. Ser. F, Civil engineering. Applied sciences. 2019. No. 8. Pp. 29–33.

20. Hassan S., Tesfamichael A., Mohd Nor M. Comparison study of thermal insulation characteristics from oil palm fibre. MATEC Web of Conferences. ICPER 2014 - 4 th International Conference on Production, Energy and Reliability. 2014. Volume 13. P. 5.

21. Bakatovich A.A., Romanovskiy S.A. Insulating material on the basis of bark fibre of the olive palm tree. European and National Dimension in Research: IX Junior Researchers Conference, Novopolotsk, April 26–27, 2017: in 3 p. Polotsk stage University. Novopolotsk, PSU. 2017. P. 3. Pp. 104–107.

22. Sovetnikov D.O., Semashkina D.O., Baranova D.V. The optimal thickness of the outer wall insulation to create an energy-efficient and environmentally friendly building in St. Petersburg [Optimal'naya tolshchina uteplatelya naruzhnoy steny dlya sozdaniya energoeffektivnogo i ekologichnogo zdaniya v usloviyakh Sankt-Peterburga]. Construction of unique buildings and structures. ISSN 2304-6295. 2016. No. 12 (51). Pp. 7–19.

23. TU BY 391129716.001-2015. Sound-absorbing heat-insulating plates. Technical conditions – Intr. 27.07.2015. Orekhovsk. 2015. 10 p.

24. Bakatovich A.A., Romanovskiy S.A. Features of the influence of moisture on the thermal conductivity of a fibrous heat-insulating material made of flax fleece [Osobennosti vliyaniya vlazhnosti na teploprovodnost' voloknistogo teploizolyatsionnogo materiala iz ochesov l'na]. Materials of the II International Scientific Conference «Education. Transport. Innovation. Construction». Omsk, April 18-19, 2019. Siberian State Automobile and Highway University. 2019. Pp. 432–439.

25. Davydenko N.V. Thermal insulation boards based on crop waste and inorganic binder [Teploizolyatsionnyye plity na osnove otkhodov rastenievodstva i neorganicheskogo vyazhushchego]. diss. ... Cand. tech. Sciences: 05.23.05. 2016. P. 104.

Information about the author

Romanovskiy, Sergey A. E-mail: s.romanovskiy@psu.by. Polotsk State University. Belarus. 211446, Novopolotsk, st. Blokhin, 29.

Received 18.05.2021

Для цитирования:

Романовский С.А. Опыт применения теплоизоляционных плит на основе волокон растительного происхождения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 1. С. 31–43. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-31-43

For citation:

Romanovskiy S.A. Experience of application of heat-insulating plates based on plant fibers. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 1. Pp. 31–43. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-31-43

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-44-50

Панченко Л.А.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

E-mail: panchenko.bstu@mail.ru

РАСЧЕТ ФИБРОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ ФИЗИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ

Аннотация. Наличие сведений о физико-механических свойствах фибробетона позволяет вести расчет конструкций на его основе с надлежащим приближением к реальности. Накопленные экспериментальные данные, касающиеся модулей упругости первого и второго рода, коэффициента Пуассона, пределов прочности на растяжение и сжатие при характерных длинах волокон и процентах армирования по массе, являются условием создания алгоритма расчета таких конструкций. Этому способствует переход от линейно упругой постановки задачи к учету физической нелинейности. В рамках программных комплексов, основанных на конечно-элементной модели деформируемого тела, приемлем итерационный процесс, обусловленный сходимостью решения. Предложенный метод дополнительных нагрузок в конечно-элементной интерпретации оставляет в силе накопленный опыт автоматизированного проектирования. Итерационная процедура расчета содержит циклы с постепенным приближением физических модулей к их истинному значению в результате сходимости решения задачи. Критерий сходимости имеет энергетическую природу. Вычисление модулей упругости ведется на основе зависимостей механики деформируемого твердого тела, что придает постановке задачи фундаментальный характер. Эффект предложенной методики демонстрируется на примере расчета заглубленного цилиндрического резервуара из стеклофибробетона для жидкости. Добавление стекловолокон в бетон приводит к улучшению сопротивляемости трещинообразованию и уменьшению величины раскрытия трещин.

Ключевые слова: фибробетонные конструкции, стеклянные и углеродные волокна, физическая нелинейность, матрица жесткости, диаграмма сдвига, конечно-элементная интерпретация метода дополнительных нагрузок.

Введение. Успехи в области повышения активности минеральных вяжущих веществ, в первую очередь цемента, позволили значительно повысить предел прочности бетонов на сжатие. В то же время прочность на растяжение оставалась во много раз ниже прочности на сжатие. Это несоответствие в некоторой мере сглаживается использованием волокон в качестве арматуры. Наряду с применением металлических элементов большое распространение получили стеклянные и углеродные волокна [1–11].

Фибробетон, содержащий те или иные волокна, как и бетон, деформируется по нелинейному физическому закону. Механические характеристики (модуль продольной деформации, коэффициент поперечной деформации, модуль сдвига) являются переменными величинами и зависят от деформации. Их значения определяются на основе стандартных испытаний. Автором проведены такого рода исследования для цилиндрических элементов из стеклофибробетона. Серии отличались длиной волокна (20 мм, 35 мм, 50 мм) и процентом армирования (1,5 %, 3 %, 4,5 %) в различных сочетаниях. Результаты испытаний представлены в табличной форме [12].

Для определения прочностных характеристик стеклофибробетона (предела прочности на

растяжение, сжатие) также использовалась стандартная методика с применением образцов в виде кубиков и призм.

Накопленный материал о физико-механических свойствах фибробетона [13, 14] позволяет вести расчет конструкций на его основе с надлежащим приближением к реальности. Этому способствует переход от линейно упругой постановки задачи к учету физической нелинейности. В рамках программных комплексов, основанных на конечно-элементной модели деформируемого тела, приемлем итерационный процесс, обусловленный сходимостью решения.

Материалы и методы. Известно, что при линейном физическом законе прямая задача содержит в качестве неизвестных 15 компонентов напряжений, деформаций и перемещений. Для их определения используются 15 уравнений по трем законам деформирования твердого тела. При наличии нелинейных деформаций в прямой задаче появляются дополнительные неизвестные – интенсивности касательных напряжений τ_i и деформаций сдвига γ_i , а дополнительными уравнениями являются выражение: γ_i и зависимость между τ_i и γ_i [15].

Возможности современной вычислительной техники привели к разработке общих численных алгоритмов решения нелинейных задач. Одним из наиболее эффективных способов построения

таких алгоритмов является линеаризация. Рассматриваемые ниже их варианты предложены российскими учеными А.А. Ильюшиным и И.А. Биргером.

При решении в перемещениях в дифференциальных уравнениях и граничных условиях слагаемые, возникающие из-за отклонения от закона Гука, переносятся в правые части уравнений и считаются известными. Таким образом, получаем систему уравнений линейной теории деформирования относительно компонентов перемещений, но с дополнительными объемными и поверхностными силами. В первом приближении полагаем эти дополнительные нагрузки равными нулю и решаем физически линейную задачу. Найдя перемещения, вычисляем интенсивность γ_i , позволяющую определить нелинейные члены в уравнениях Ламе и граничных условиях и решить вторичную физически линейную задачу с дополнительными нагрузками, отличными от нуля и т.д. Такого рода алгоритм получил название метода дополнительных нагрузок.

При решении в напряжениях используется метод дополнительных деформаций. Дифференциальные уравнения равновесия и граничные условия остаются без изменения. Уравнения сплошности вследствие наличия нелинейных членов в выражении физического закона будут содержать дополнительные слагаемые, которые

$$D = \frac{2G}{1-2\nu} \begin{vmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(1-2\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(1-2\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(1-2\nu) \end{vmatrix}, \quad (1)$$

где G – модуль сдвига, ν – коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона).

Для физической нелинейности характерны переменные величины этих характеристик. Диапазон изменения коэффициента поперечной деформации мал, в связи с чем, его часто принимают неизменным. Фактический модуль сдвига имеет выражение:

$$G(\gamma_i) = G \left(1 - \frac{\gamma_i}{2\gamma_{is}} \right), \quad (2)$$

где $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ – элементы тензора деформаций.

При трещинообразовании в фибробетоне имеет место увеличение объема тела – дилатация $g_0 \gamma_i^2$, где g_0 – модуль дилатации, зависящий от свойств бетона, типа и содержания армирующих

можно интерпретировать как дополнительные деформации и определять их последовательными приближениями.

Имеет место также метод переменных параметров упругости. Систему уравнений представляют в форме уравнений линейной теории с переменными «параметрами упругости» $E(\lambda)$ и $\nu(\lambda)$ (λ – отражает процесс деформирования), которые в процессе последовательных приближений вычисляются по деформациям.

Природа физической нелинейности фибробетона исходит из механических свойств бетона, проявляющихся в диаграмме «напряжение-деформация», явлении дилатации. Условием создания алгоритма расчета конструкций является наличие экспериментальных данных, касающихся модулей упругости первого и второго рода, коэффициента Пуассона, пределов прочности на растяжение и сжатие при характерных длинах волокон и процентах армирования по массе.

Построение расчета проведено на основе метода конечных элементов (МКЭ), используемого в инженерной практике для решения задач различного типа. Матрица жесткости конечного элемента содержит матрицу упругости D как характеристику связи между напряжениями и деформациями [15]:

где γ_i и γ_{is} – интенсивность деформаций сдвига для фактического состояния и ее предельная величина для рассматриваемого вида напряженного состояния, то есть

$$\gamma_i = 2 \sqrt{I_{\varepsilon 2}^*}, \quad (3)$$

где $I_{\varepsilon 2}^*$ – второй инвариант девиатора деформаций, равный

$$I_{\varepsilon 2}^* = \frac{1}{6} [(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2] + \frac{1}{4} (\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2), \quad (4)$$

волокон. При чистом сдвиге предельная объемная деформация ϑ_c зависит от предельной интенсивности деформации сдвига γ_{is} [16]:

$$\vartheta_c = g_0 \gamma_{ic}^2, \quad (5)$$

откуда вытекает значение модуля:

$$g_0 = \frac{\vartheta_c}{\gamma_{ic}^2}. \quad (6)$$

Линейные деформации дополняются величиной $g_0\gamma_{ic}^2/3$. Сохраняется предположение о пропорциональности и соосности девиаторов напряжений и деформаций.

Величина γ_{is} зависит от инвариантов тензора $I_{\varepsilon 1}$ и девиаторов $I_{\varepsilon 2}^*$, $I_{\varepsilon 3}^*$ деформаций, в которых находят отражение прочность фибробетона на сжатие R_{fbc} и растяжение R_{fbt} . Эти характеристики, как и модуль g_0 , зависят от свойств бетона, типа и содержания армирующих волокон. В качестве математической модели γ_{is} можно использовать аналогичную модель для бетона с заменой характеристик R_{bc} и R_{bt} на R_{fbc} и R_{fbt} [12].

Основная часть. Как следует из изложенных выше положений о физической нелинейности, синтезирующее уравнение метода конечных элементов содержит вместо постоянной матрицы жесткости K ее переменный аналог $\bar{K}$ так, что

$$\bar{K} = K + \Delta K, \quad (7)$$

где ΔK – корректирующая матрица, равная

$$\Delta K = \sum_e \Delta k_e, \quad (8)$$

где Δk_e – корректирующая матрица отдельного конечного элемента, число которых e .

Эта предпосылка заставляет заменить решение упомянутого уравнения МКЭ итерационным решением рекуррентного уравнения:

$$Kq^{(s)} = F - \Delta K(q^{(s-1)})q^{(s-1)}, \quad (9)$$

или

$$Kq^{(s)} = F - \Delta F^{(s-1)}, \quad (10)$$

где $q^{(s)}$ – s -е приближение q ; ΔF – фиктивная дополнительная нагрузка, равная

$$\Delta F^{(s-1)} = \Delta K(q^{(s-1)})q^{(s-1)}. \quad (11)$$

Сходимость итерационного процесса подтверждена решениями типовых задач. Критерий сходимости имеет энергетическую природу:

$$\frac{|W_e - W_m|}{W_m} \leq \varepsilon_0, \quad (12)$$

где W_e – потенциальная энергия деформации конечного элемента; W_m – средняя величина для e величин W_e ; ε_0 – некоторое малое положительное число.

Алгоритм решения физически нелинейной задачи включает: начальный модуль (модуль упругости) и модуль дилатации; формирование

матрицы жесткости для отдельных элементов; формирование матрицы жесткости для тела и вектора узловых сил; решение уравнений МКЭ; определение модулей по формуле (2); формирование новых матриц жесткости конечных элементов; определение Δk_e ; формирование ΔK ; решение уравнения (10); проверка удовлетворения критерию (12) и другим неучтенным ограничениям (по прочности, деформативности и т. д.). При необходимости следующий цикл начинается с определения модулей упругости по формуле (2).

Изложенная теория, касающаяся определения напряженно-деформированного состояния тела при наличии физической нелинейности, использована при расчете цилиндрических резервуаров для нефтепродуктов. При расчетах бетонных резервуаров без учета влияния растяжения бетона допускалось раскрытие трещин до величины 0,2 мм, а при учете влияния растяжения бетона – до 0,1 мм [17, 18]. Включение стекловолокон в бетон увеличивает сопротивляемость трещинообразованию, и допускаемую величину раскрытия трещин можно уменьшить до 0,05 мм.

В качестве примера рассмотрен резервуар, моделью которого является шарнирно опертая оболочка в грунте радиусом 4 м, длиной 6 м, толщиной стенок 0,05 м. Модуль упругости стеклофибробетона $2 \cdot 10^4$ МПа, коэффициент Пуассона – 0,17. Толщина прилегающего деформируемого слоя основания 5 м, модуль деформации грунта 60 МПа, коэффициент Пуассона 0,3. Давление на боковую поверхность оболочки составляет 500 кН/м.

Исходные данные взяты из решения задачи в линейно-упругой постановке [17]. Учет физической нелинейности потребовал трех приближений расчета. Перемещения срединной поверхности оболочки увеличились на 10–12 %, а изгибающие моменты на 14–16 %. В результате армирование стекловолокнами увеличено на 1,1 %.

Рассмотрим частный случай кручения цилиндрического бруса круглого поперечного сечения радиуса R из материала с билинейной диаграммой сдвига (рис. 1).

Установим зависимость между крутящим моментом T и кривизной кручения. При $\frac{\gamma_1}{R} < k_k \leq \frac{\gamma_2}{R}$ брус имеет внутреннюю зону деформирования, связанную с участком диаграммы 0–1, и наружную зону, связанную с участком 1–2. Граница между этими зонами определяется радиусом

$$r_1 = \frac{\tau_1}{Gk_k}. \quad (13)$$

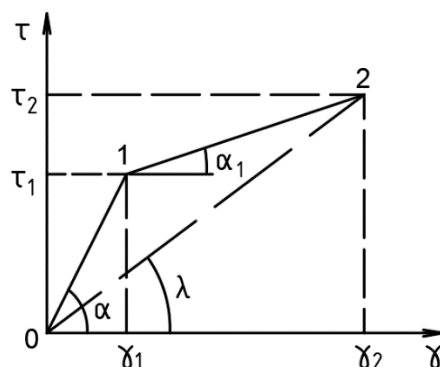


Рис. 1. Диаграмма сдвига: γ – деформация сдвига; τ – касательные напряжения; $\alpha = \arctg G$ (G – модуль сдвига), $\alpha_1 = \arctg G_1$ (G_1 – модуль упрочнения)

Выражение крутящего момента имеет вид или

$$T = 2\pi k_k \left[\int_0^{r_1} G r^3 dr + \int_{r_1}^R G(\lambda) r^3 dr \right]. \quad (14) \quad G(\lambda) = \frac{r_1}{r} G + \left(1 - \frac{r_1}{r}\right) G_1. \quad (16)$$

В данном случае

В итоге получаем

$$G(\lambda) = \frac{1}{\gamma} [\gamma_1 G + (\gamma - \gamma_1) G_1], \quad (15)$$

$$T = \pi k_k \left[\frac{1}{2} G r_1^4 + \frac{2}{3} r_1 (R^3 - r_1^3) (G - G_1) + \frac{1}{2} (R^4 - r_1^4) G_1 \right]. \quad (17)$$

Предположим, что пределу несущей способности бруса соответствует появление на контуре сечения напряжений τ_2 .

При этом

$$r_1 = \frac{\gamma_1}{\gamma_2} R. \quad (18)$$

При замене переменной r на γ/k_k формула (17) принимает вид

$$T = \frac{1}{k_k^3} \left\{ G \int_0^{\gamma_1} \gamma^2 d\gamma + \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} [\gamma_1 (G - G_1) + \gamma G_1] \gamma d\gamma \right\}. \quad (19)$$

Формула (19) выгодно отличается от формулы (17) своей непосредственной связью с диаграммой сдвига.

Кроме рассмотренной физической нелинейности существуют также и другие виды нелинейности. Геометрическая нелинейность имеет место, во-первых, когда перемещения конструкции вызывают значительные изменения в ее геометрии, так, что уравнения равновесия приходится составлять с учетом изменения формы и размеров конструкции (по деформированной схеме), во-вторых, когда зависимость между перемещениями и деформациями нелинейная.

Конструктивная нелинейность возникает вследствие конструктивных особенностей системы, вызывающих изменение расчетной схемы в процессе деформирования (например, изменяются условия закрепления). Она имеет место в конструкциях с односторонними связями, встречается также в контактных задачах.

При наличии физической и одного из указанных видов нелинейности в комплексе уравнений для решения такого рода задач появляются дополнительные, специфические уравнения, например, новые зависимости между деформациями и

перемещениями, уравнения для условий контакта и другие. При этом остаются в силе предложенные в статье методы решения физически нелинейной задачи.

Выводы. Учет физической нелинейности при расчете конструкций из фибробетона позволяет в определенной мере приблизить физическую модель к реальным обстоятельствам. Предложенный метод дополнительных нагрузок в конечно-элементной интерпретации оставляет в силе накопленный опыт автоматизированного проектирования [19]. Итерационная процедура расчета содержит циклы с постепенным приближением физических модулей к их истинным значениям в результате сходимости решения задачи. Вычисление модулей ведется на основе зависимостей механики деформируемого твердого тела, что придает постановке задачи фундаментальный характер. Эффект предложенной методики демонстрируется на примере расчета заглубленного цилиндрического резервуара из стеклофибробетона для жидкости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Волков И.В. Проблемы применения фибробетона в отечественном строительстве // Строительные материалы. 2004. № 6. С. 12–13.
2. Волков И.В., Газин Э.М., Бабекин В.В. Инженерные методы проектирования фибробетонных конструкций // Бетон и железобетон. 2007. № 4. С. 20–22.
3. Олюнин П.С. Дисперсное армирование цементных композитов полимерными волокнами // Бетон и железобетон. 2009. № 1. С. 21–24.
4. Проектирование и основные положения технологий производства фибробетонных конструкций. (ВСН 56-97). М.: НТУ НИЦ «Строительство», 1997. 91 с.
5. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции. М.: Изд-во АСВ, 2004. 560 с.
6. Сталефибробетонные конструкции (СП 52-104-2006). М.: ФГУП НИЦ «Строительство», 2007. 61 с.
7. Grace N.F., Singh S.B. Design approach for carbon fiber-reinforced polymer prestressed concrete bridge beams // ACI Structural Journal. 2003, May-June. P. 365–376.
8. Lorenzis L. de., Miller B., Nanni A. Bond of FRP laminates to concrete // ACI Material Journal. V. 98. 2001. №3. P. 256–264.
9. Reda Taha M.M., Shrive N.G. Enhancing fracture toughness of high-performance carbon fiber cement composites // ACI Materials Journal. 2001. №2. P. 168–178.
10. Panchenko L.A. Design of transformable beam systems. Innovations and technologies in construction. BUILDINTECH BIT 2021. Civil Engineering Lecture Notes. 2021. Vol. 151. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72910-3_47.
11. Panchenko L.A. Concrete and fiber-reinforced concrete in a fiber-reinforced polymer framework. BUILDINTECH BIT 2020. Civil Engineering Lecture Notes. 2021. Vol. 95. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54652-6_20.
12. Панченко Л.А. Строительные конструкции с волокнистыми композитами. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2013, 183 с.
13. Мэттьюз Ф., Ролингс Р. Композитные материалы. Механика и технология / Пер. с англ. С.Л. Баженова. М.: Техносфера, 2004. 408 с.
14. Юрьев А.Г., Панченко Л.А. Исследования деформирования элементов стеклофибробетонных конструкций. Наука и инновации в строительстве SIB-2008. Матер. Междунар. Конгресса. Воронеж. 2008. Том. 2. С. 254–257.
15. Юрьев А.Г. Вариационные принципы строительной механики. Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 2002. 90 с.
16. Гениев Г.А., Киссюк В.Н., Тюпин Г.А. Теория пластичности бетона и железобетона. М.: Стройиздат, 1974. 316 с.
17. Панченко Л.А. Железобетонные цилиндрические резервуары с дополнительным армированием стекловолокном // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2009. № 2. С. 68–71.
18. Панченко Л.А., Шевченко А.В. Железобетонный цилиндрический резервуар с дополнительным дисперсным армированием // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 9. С. 38–42.
19. Матус Е.П. Применение компьютерного моделирования при расчете прочности при растяжении фибробетона // Известия вузов. Строительство. 2005. № 6. С. 103–105.

Информация об авторах

Панченко Лариса Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической механики и сопротивления материалов. E-mail: panchenko.bstu@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 10.06.2021 г.

© Панченко Л.А., 2022

Panchenko L.A.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

E-mail: panchenko.bstu@mail.ru

CALCULATION OF FIBER-REINFORCED CONCRETE STRUCTURES TAKING INTO ACCOUNT PHYSICAL NONLINEARITY

Abstract. The availability of information about the physical and mechanical properties of fiber-reinforced concrete allows to calculate structures based on it with a proper approximation to reality. The experimental data on the elastic modulus of the first and second kind, the Poisson's ratio, the tensile and compressive strength limits for characteristic fiber lengths and the percentage of reinforcement by weight are a condition

for creating an algorithm for calculating such structures. This is facilitated by the transition from a linear elastic formulation of the problem to the consideration of physical nonlinearity. In the framework of software systems based on a finite element model of a deformable body, an iterative process is acceptable, due to the convergence of the solution. The proposed method of additional loads in the finite element interpretation leaves the accumulated experience of computer-aided design. The iterative calculation procedure contains cycles with a gradual approximation of the physical modules to their true value as a result of the convergence of the solution of the problem. The convergence criterion has an energy nature. The calculation of the modules is based on the dependencies of the mechanics of a deformable solid. This gives a fundamental character to the formulation of the problem. The effect of the proposed method is demonstrated by the example of calculating a buried cylindrical tank made of glass-fiber concrete for liquid. The addition of glass fibers to concrete leads to an improvement in the resistance to cracking and a decrease in the amount of crack opening.

Keywords: fiber-reinforced structures, glass and carbon fibers, physical nonlinearity, stiffness matrix, shear diagram, finite element interpretation of the method of additional loads.

REFERENCES

1. Volkov I.V. Problems of using fiber-reinforced concrete in domestic construction. [Problemy primeneniya fibrobetona v otechestvennom stroitelstve]. Building materials. 2004. No. 6. Pp. 12–13 (rus)
2. Volkov I.V., Gazin E.M., Babekin V.V. Engineering methods for the design of fiber-reinforced concrete structures. [Inzhenernye metody proektirovaniya fibrobetonnykh konstrukcij]. Concrete and reinforced concrete. 2007. No. 4. Pp. 20–22 (rus)
3. Olyunin P.S. Dispersed reinforcement of cement composites with polymer fibers. [Dispersnoe armirovanie cementnykh kompozitov polimernymi voloknami]. Concrete and reinforced concrete. 2009. No.1. Pp. 21–24 (rus)
4. Design and basic provisions of technologies for the production of fiber-reinforced concrete structures. [Proektirovanie i osnovnye polozheniya tekhnologij proizvodstva fibrobetonnykh konstrukcij]. (VSN 56-97). M.: NTU NITs "Construction", 1997. 91 p. (rus)
5. Rabinovich F.N. Composites based on dispersed reinforced concrete. Questions of theory and design, technology, construction. [Kompozity na osnove dispersno armirovannykh betonov. Voprosy teorii i proektirovaniya, tekhnologiya, konstrukcii]. Moscow: ASV Publishing House, 2004. 560 p. (rus)
6. Steel-fiber concrete structures [Stalefibrobetonnye konstrukcii (SP 52-104-2006)]. (SP 52-104-2006). M.: FGUP NITs "Construction", 2007. 61 p. (rus)
7. Grace N.F., Singh S.B. Design approach for carbon fiber-reinforced polymer prestressed concrete bridge beams. ACI Structural Journal. 2003, May-June. Pp. 365–376.
8. Lorenzis L. de., Miller B., Nanni A. Bond of FRP laminates to concrete. ACI Material Journal. V. 98. 2001. No. 3. Pp. 256–264.
9. Reda Taha M.M., Shrive N.G. Enhancing fracture toughness of high-performance carbon fiber cement composites. ACI Materials Journal. 2001. No. 2. Pp. 168–178.
10. Panchenko L.A. Design of transformable beam systems. Innovations and technologies in construction. BUILDINTECH BIT 2021. Civil Engineering Lecture Notes. 2021. Vol. 151. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72910-3_47.
11. Panchenko L.A. Concrete and fiber-reinforced concrete in a fiber-reinforced polymer framework. BUILDINTECH BIT 2020. Civil Engineering Lecture Notes. 2021. Vol. 95. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54652-6_20.
12. Panchenko L.A. Building structures with fiber composites. [Stroitel'nye konstrukcii s voloknistymi kompozitami]. Belgorod: Publishing house of BSTU im. V.G. Shukhova, 2013, 183 p. (rus)
13. Matthews F., Rawlings R. Composite materials. Mechanics and technology. [Kompozitnye materialy. Mekhanika i tekhnologiya]. Per. from English S.L. Bazhenov. Moscow: Tekhnosfera, 2004. 408 p. (rus)
14. Yuriev A. G., Panchenko L. A. Studies of deformation of elements of glass-fiber concrete structures. [Issledovaniya deformirovaniya ehlementov steklofibrobetonnykh konstrukcij]. Science and Innovation in Construction SIB-2008. Mater. International. Of the Congress. Voronezh. 2008. Vol. 2. Pp. 254–257 (rus)
15. Yuriev A.G. Variational principles of structural mechanics. [Variacionnye principy stroitel'noj mekhaniki]. Belgorod: BelGTASM Publishing House, 2002. 90 p. (rus)
16. Geniev G.A., Kissyuk V.N., Tyupin G.A. The theory of plasticity of concrete and reinforced concrete. [Teoriya plastichnosti betona i zhelezobetona]. Moscow: Stroyizdat, 1974. 316 p. (rus)
17. Panchenko L.A. Reinforced concrete cylindrical tanks with additional fiberglass reinforcement. [Zhelezobetonnye cilindricheskie rezervuary s dopolnitel'nym armirovaniem steklovoloknom]. Vestnik BGTU im. V.G. Shukhov. 2009. No. 2. Pp. 68–71 (rus)
18. Panchenko L.A., Shevchenko A.V. Reinforced concrete cylindrical tank with additional dispersed reinforcement. [Zhelezobetonnyj

cilindricheskij rezervuar s dopolnitel'nym dispersnym armirovaniem]. Vestnik BGTU im. V.G. Shukhov. 2017. No. 9. Pp. 38–42 (rus)

19. Matus E.P. Application of computer modeling in calculating the tensile strength of fiber-rein-

forced concrete. [Primenenie komp'yuternogo modelirovaniya pri raschete prochnosti pri rastyazhenii fibrobetona]. Izvestiya vuzov. Building. 2005. No. 6. Pp. 103–105 (rus)

Information about the authors

Panchenko, Larisa A. PhD. E-mail: panchenko.bstu@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 10.06.2021

Для цитирования:

Панченко Л.А. Расчет фибробетонных конструкций с учетом физической нелинейности // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 1. С. 44–50. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-44-50

For citation:

Panchenko L.A. Calculation of fiber-reinforced concrete structures taking into account physical nonlinearity. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 1. Pp. 44–50. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-44-50

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-51-59

^{1,*}Шаптала В.В., ¹Хукаленко Е.Е., ²Северин Н.Н., ²Гусев Ю.М.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова²Белгородский юридический институт МВД России им. И.Д. Путилина

*E-mail: ShaptalaVadim@yandex.ru

ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ВЕНТИЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОСВАРОЧНЫХ РАБОЧИХ МЕСТ В ПОМЕЩЕНИЯХ ОГРАНИЧЕННЫХ РАЗМЕРОВ

Аннотация. Основным направлением нормализации параметров воздушной среды при выполнении электросварочных работ предлагается рассматривать устройство комплексной системы вентиляции, совмещающей местную вытяжную вентиляцию рабочих мест сварщиков и общеобменную вентиляцию помещений. При организации вентиляции сварочных помещений ограниченных размеров необходимо учитывать возможное влияние сносных потоков, возникающих в результате совместной работы вытяжных устройств. Целью проводимых исследований является анализ влияния на эффективность устройств местной вытяжной вентиляции сварочных постов объемно-планировочных решений, взаимного расположения приточно-вытяжных устройств, а также особенностей выполнения технологических операций. Для конкретного примера сварочного помещения найден оптимальный вариант организации вентиляции сварочных постов. С применением метода компьютерного моделирования рассчитаны поля подвижности воздуха, его температуры и концентрации вредных примесей. Выявлены факторы, влияющие на эффективность работы местных вытяжных устройств и установлены сочетания влияющих факторов, обеспечивающих предельно допустимые концентрации вредных выделений в рабочих зонах сварщиков. Определены условия, при которых общеобменного эффекта местных отсосов достаточно для того, чтобы поддерживать в помещении концентрацию на уровне ПДК. Полученные в статье результаты могут применяться для разработки инженерных методов расчета и оптимизации вентиляционных устройств и систем, а также для анализа конструктивных и проектных решений по устройству вентиляции электросварочных производств. Исследования процессов распространения сварочных аэрозолей в производственном помещении выполнялось путем опытных замеров, а также компьютерного моделирования с использованием программного гидродинамического пакета Ansys Fluent.

Ключевые слова: электродуговая сварка, подъемно-поворотные вытяжные устройства, эффективность вентиляции, компьютерное моделирование.

Введение. В последнее время для вентиляции стационарных сварочных постов широкое распространение получили подъемно-передвижные вытяжные устройства. В виду того, что область захвата таких устройств не покрывает всю поверхность рабочего стола, при работе с конструкциями средних размеров для обеспечения ПДК в области дыхания сварщик вынужден периодически отвлекаться на изменение расположения всасывающей воронки. В результате это приводит к снижению производительности труда, либо к нарушению требований безопасности и ухудшению пылегазовой обстановки не только данного сварочного поста, но и в силу возникающих аэродинамических связей, может негативно влиять на обстановку смежных постов. Эффективность использования передвижного вытяжного устройства в значительной степени определяется размером зоны эффективного улавливания аэрозоля (не менее 80 %). Считается, что диаметр этой зоны не должен быть меньше 0.4 м [2, 4].

Методы и материалы. Организация сварочных участков в помещениях малых размеров

с определенным расположением вентиляционных проемов требует учитывать влияние компенсационных течений на эффективность вытяжных устройств при различных компоновках сварочных постов. На воздухообмен помещений оказывают влияние размеры помещения, расположение, конструкция, производительность местных вытяжных устройств, расположение и площади приточных проемов [1, 3]. Влияние указанных факторов на эффективность вентиляции рассмотрим на примере электросварочного помещения учебной мастерской (рис. 1).

Помещение, размерами 9×6×3м оборудовано 4-мя инверторами с максимальным сварочным током $I = 500$ А и системой местной вытяжной вентиляции, состоящей из 4-х подъемно-передвижных устройств “СовПлим”. В теплый и переходный периоды года, компенсирующий работу вытяжных устройств воздух поступает через оконные проемы. В холодный период года основная часть воздуха поступает через вентиляционный проем из смежного отапливаемого помещения. Сразу следует отметить, что данная реализация системы местной вытяжной вентиля-

ции не предусматривает индивидуального регулирования производительности вытяжных устройств и в случае эксплуатации только одного сварочного поста работают все четыре отсоса, что приводит к снижению как гигиенической так и энергетической эффективности.

Поэтому в дальнейшем ограничимся рассмотрением сценария одновременного функционирования трех сварочных постов с возможностью регулирования производительности каждого из отсосов по отдельности.



Рис. 1. Электросварочное помещение учебной мастерской

Основная часть. Для поиска оптимального варианта организации и режима работы системы вентиляции сварочного помещения использовался метод компьютерного моделирования [8, 17–22]. Параметры модели настраивались и проверялись по результатам опытных замеров параметров воздушной среды, таких как скорость

движения воздуха в помещении, температура воздуха, концентрация вредных выделений, а также по установленным экспериментальным зависимостям [4, 15, 16]. На рисунках (2-4) приведены результаты моделирования и экспериментальных исследований свободного сварочного факела.

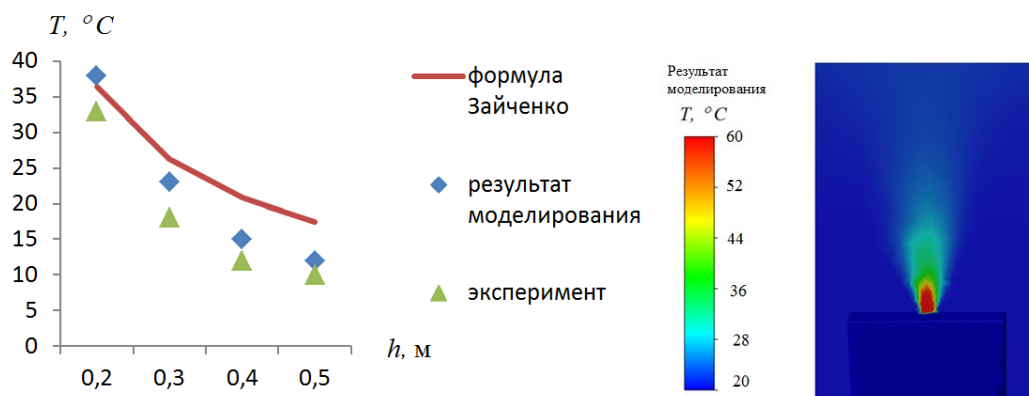


Рис. 2. Зависимость температуры на оси сварочного факела от высоты при токе сварки $I = 100$ А.

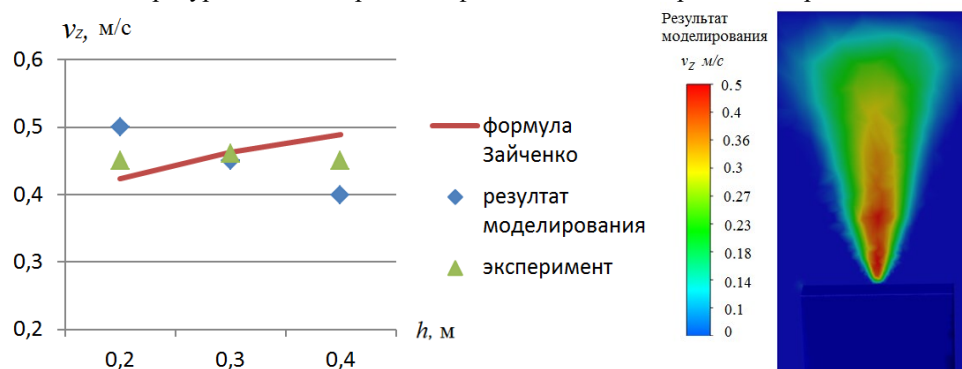


Рис. 3 Зависимость скорости воздуха на оси сварочного факела от высоты при токе сварки $I = 100$ А.

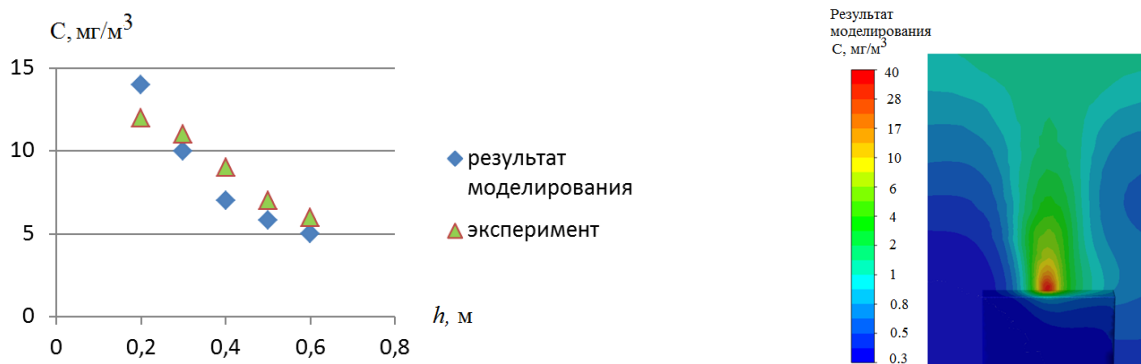


Рис. 4. Концентрация оксидов марганца на оси сварочного факела. $I = 100$ А. Интенсивность выделения сварочного аэрозоля $g = 0.36$ mg/c .

В летний период года, при поступлении воздуха, компенсирующего работу вытяжных устройств, через полностью раскрытые оконные проемы негативное влияние сносящих потоков незначительно. При такой организации притока эффективность вытяжных устройств в основном

зависит от их производительности, взаимного расположения с источниками выделения вредных веществ и их параметров, таких как интенсивность выделения вредных веществ, а также мощность сварочной дуги (рис. 5)

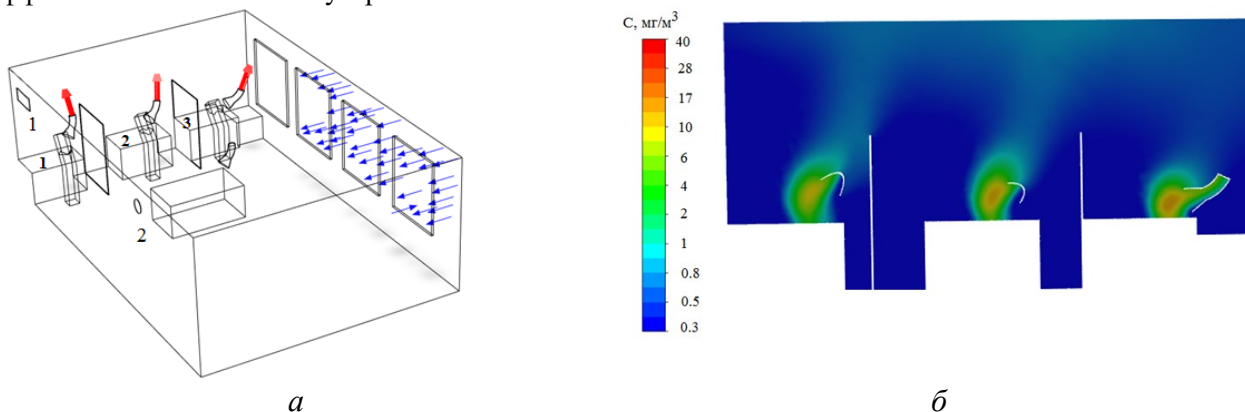


Рис. 5. Организация вентиляции сварочного помещения в летний период (а). Поле концентраций оксида марганца в вертикальном сечении помещения, проходящем через сварочные посты (б). Интенсивность выделения оксидов марганца $g = 0.36$ $\text{mg/m}^3\text{c}$, сварочный ток $I = 400$ А

В результате вычислительных экспериментов установлена зависимость необходимой производительности вытяжных устройств от мощно-

сти сварочной дуги для различных высот расположения всасывающей воронки и взаимного расположения вытяжных устройств и приточных проемов, показанного на рис. 5.

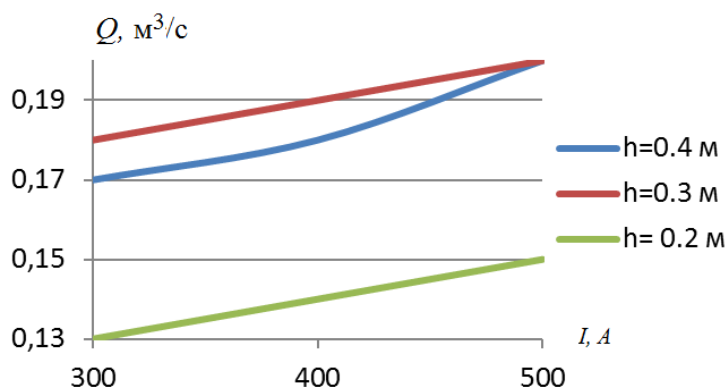


Рис. 6. Графики зависимости необходимой производительности вытяжных устройств подъемно-передвижного типа от сварочного тока для различных высот размещения всасывающей воронки вытяжного устройства. Горизонтальное расстояние от точки сварки до воронки $l = 0.4$ м

Относительно низкая производительность вытяжного устройства, расположенного на высоте 0.2 м над столом связана с ограничением области подтекания воздуха поверхностью стола. Также из графика видно, что необходимая для локализации вредностей производительность отсоса, расположенного на высоте 0.4 м ниже производительности отсоса, расположенного на высоте 0.3 м, что связано с более полным использованием энергии восходящего конвективного потока.

Для компенсации работы вытяжных устройств в холодный период года в рассматриваемом сварочном помещении предусмотрены прямоугольный вентиляционный проем 1 площадью $S = 0.3 \times 0.8$ м на высоте 2 м, расположенный в непосредственной близости к сварочным постам, а также проем круглого сечения диаметром $d = 0.2$ м на высоте 2.2 м и удаленный от постов на

расстояние 6 м (рис. 5). Первый проем соединяют мастерскую и коридор учебного корпуса. Через второй проем воздух поступает с улицы. При полностью раскрытых вентиляционных проемах, объем компенсационного воздуха распределяется следующим образом: $Q_1 = 0.45$ м³/с и $Q_2 = 0.15$ м³/с. Такое распределение притока приводит к нарушению нормального режима работы вытяжных устройств (рис. 7, а). И хотя вынос вредностей с первого поста в помещение по сравнению с планировкой, приведенной на (рис. 7, б) не значителен, поскольку неудовлетворительная работа первого отсоса компенсируется работой смежных отсосов, такое расположение приточного проема 1 приводит превышению ПДК вредностей на рабочих местах [5, 7]. Даже при одинаковой производительности вытяжных устройств $Q = 0.2$ м³/с концентрация на 1 и 3 сварочных постах превышает ПДК в 2 раза.

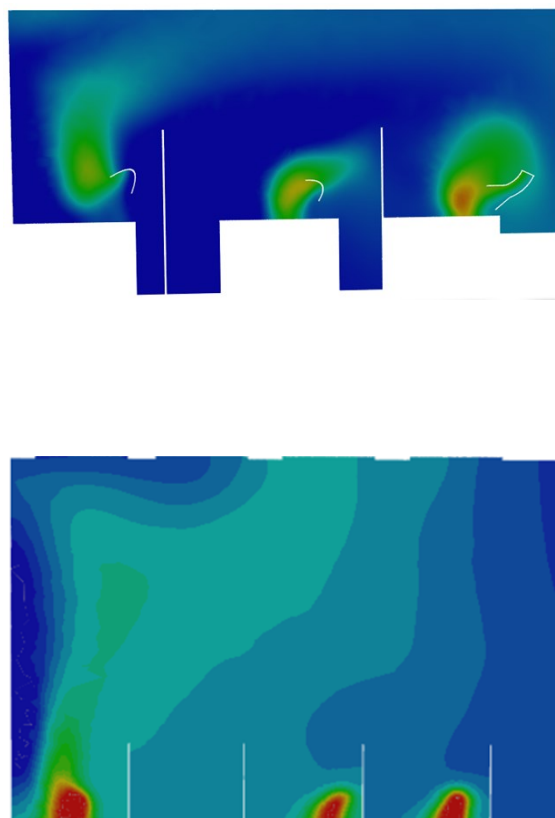
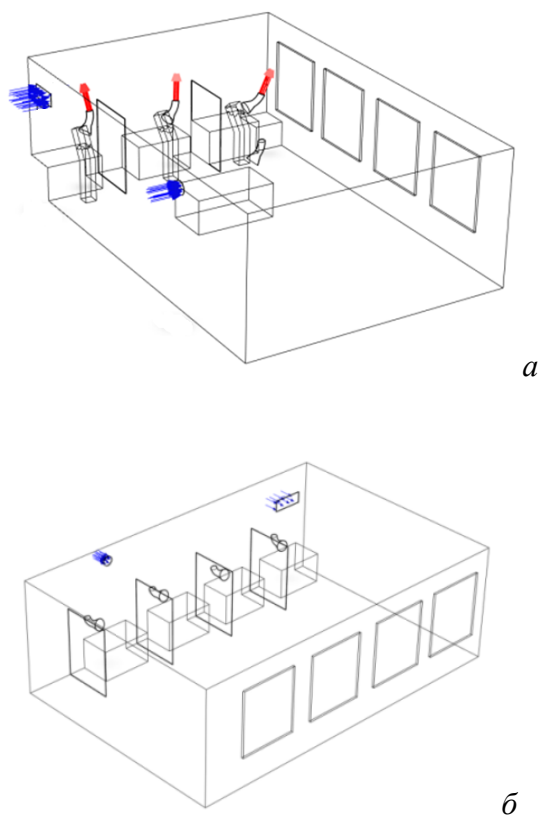


Рис. 7. Поля концентраций оксидов марганца при различных схемах размещения сварочных постов.

Сварочный ток $I = 400$ А. Расход воздуха через приточные проемы $Q_{lin} = 0.45$ м³/с $Q_{2in} = 0.15$ м³/с.

Производительность вытяжных устройств $Q_{out} = 0.2$ м³/с, интенсивность выделения $g = 0.36$ мг/м³с.

При таких условиях, нормализовать пылегазовую обстановку на рабочих местах можно путем поиска наиболее приемлемого расположения отсосов [6–13]. Так на рис. 8, а компенсационный поток вытяжного устройства 3-го поста

имеет направление, противоположное направлению всасывающего факела, а на рис. 8б, он создает дополнительный передувочный эффект.

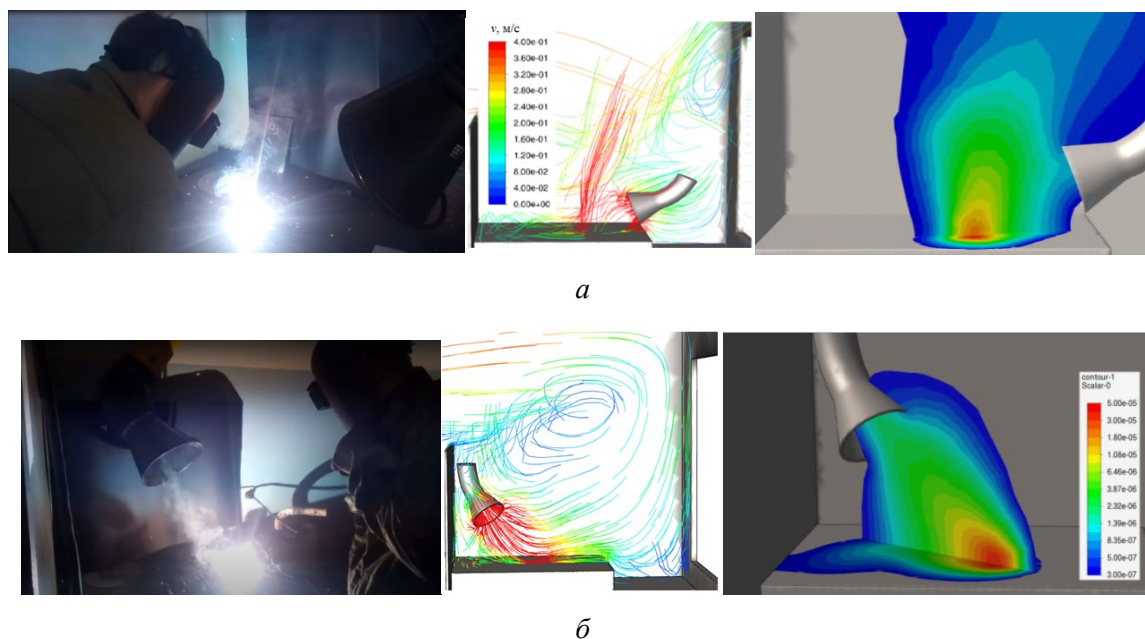


Рис. 8. Распределение концентрации вредных и линии тока воздуха на третьем сварочном посту при разной ориентации всасывающей воронки вытяжного устройства. Производительность вытяжек $Q = 0.2 \text{ м}^3/\text{с}$.

Однако, удаление точки сварки от всасывающей воронки более чем на 0.4 м. приводит к резкому увеличению концентрации вредных в зоне дыхания за счет накопления их в образовавшейся циркуляционной зоне.

Нормализовать пылегазовую обстановку на первом посту при таком расположении и произ-

водительности притока можно только путем размещения воронки вытяжного устройства в непосредственной близости к источнику выделения вредных рис. 9, а. Наиболее благоприятные условия работы при такой организации вентиляции наблюдаются на втором посту (рис. 9, б)



а



б

Рис. 9 Распределение вредных на первом (а) и втором (б) постах. Высота расположения всасывающих воронок $h = 0.4 \text{ м}$. Горизонтальное расстояние от точки сварки до воронки $l = 0.4 \text{ м}$.

Таким образом, в целом такая организация вентиляции сварочного помещения в холодных период года является неудовлетворительной. Снизить энергоемкость системы вентиляции при обеспечении нормируемых значений параметров воздушной среды рабочей зоны сварщиков можно за счет подачи компенсационного воздуха через вентиляционный проем, удаленный от зоны сварки совместно с ориентацией всасывающих воронок вытяжных устройств навстречу течениям компенсационного воздуха. Например, при организации притока через проем площадью $S = 0.3 \times 0.8 \text{ м}^2$, размещенного на расстоянии 6 м

от сварочных постов на высоте 2 м и при сохранении прежней ориентации всасывающих воронок устройств производительностью $Q_1 = 0.18 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q_2 = 0.19 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q_3 = 0.14 \text{ м}^3/\text{с}$ пылегазовая обстановка на сварочных постах все еще остается неудовлетворительной (рис.10).

Переориентация всасывающих воронок навстречу потокам компенсационного воздуха позволяет полностью нормализовать условия труда сварщиков.

Учет указанных рекомендаций по организации вентиляции сварочного помещения учебной мастерской позволит сократить энергопотребление системы вентиляции в среднем на 15 %.

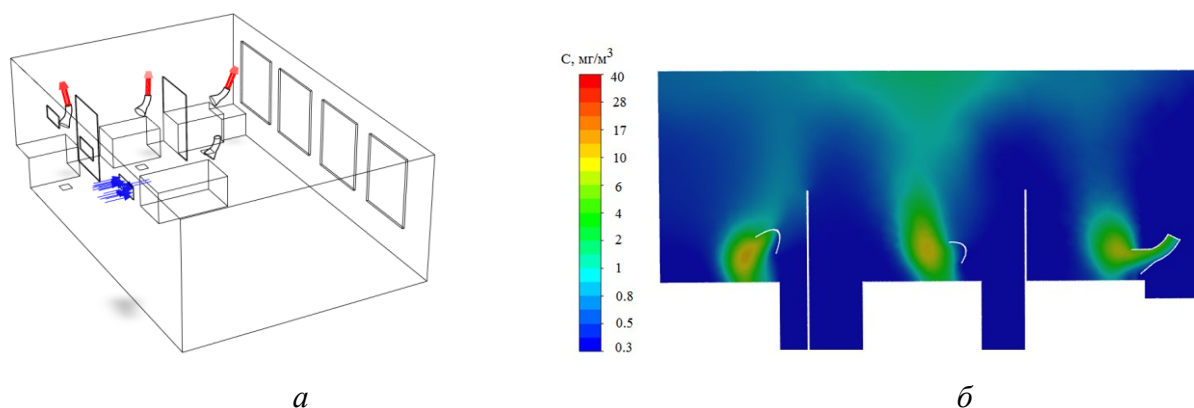


Рис. 10. Влияние на пылегазовую обстановку помещения удаленного от сварочных постов размещения приточного проема. *a* – схема размещения приточного проема, *b* – поле концентраций оксидов марганца в сечении, проходящем через сварочные посты. Концентрации вредностей в зоне дыхания на сварочных постах $C_1 = 0.47$ мг/м³, $C_2 = 0.53$ мг/м³, $C_3 = 0.35$ мг/м³.

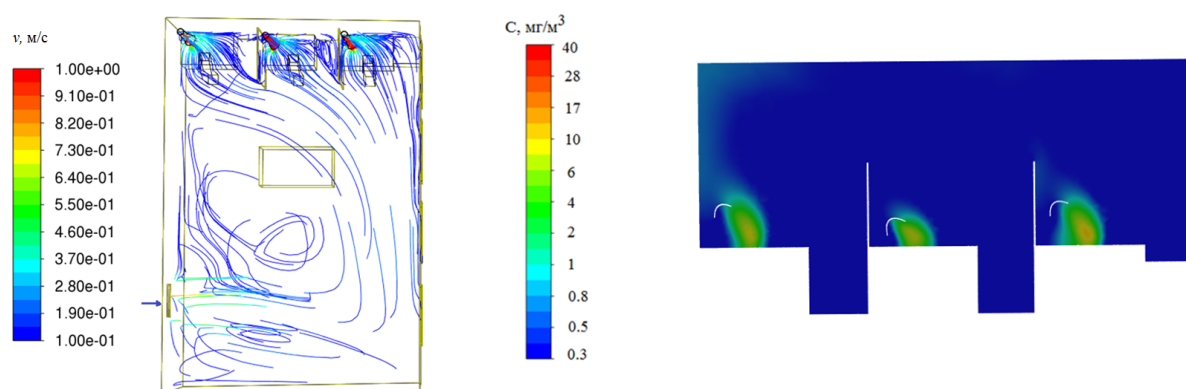


Рис. 11. Линии тока воздуха в помещении на высоте 1 м (*a*) и поле концентраций оксидов марганца в поперечном сечении, проходящем через сварочные посты (*b*).

Выводы. При организации сварочных участков в малых помещениях с компактными приточными проемами для обеспечения приемлемой пылегазовой обстановки на рабочих местах целесообразно решать вопрос взаимного расположения и ориентации приточно-вытяжных устройств таким образом, чтобы минимизировать влияние сносящих потоков на эффективность вытяжных устройств или использовать энергию компенсационных потоков для повышение эффективности вытяжных устройств, а не наоборот. Найдены сочетания влияющих факторов, обеспечивающие предельно допустимые концентрации вредных примесей в рабочей зоне.

Полученные в статье результаты могут применяться для разработки инженерных методов расчета и оптимизации вентиляционных устройств и систем, а также для анализа конструктивных и проектных решений по устройству вентиляции электросварочных производств при их реконструкции и модернизации.

Источник финансирования: Исследование выполнено в рамках гранта РНФ (проект 18-79-10025).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Логачев И.Н., Логачев К.И., Аверкова О.А. Энергосбережение в аспирации. Москва, Ижевск: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, 2013. 504 с.
2. Grititlin A.M. Ventilation of electric welding production // World Applied Sciences Journal. 2013.Vol. 23. No. 13. Pp. 50-54.
3. Посохин В.Н. Расчет местных отсосов от тепло- и газовыделяющего оборудования. М.: Машиностроение, 1984. 160с.
4. Писаренко В.Л., Рогинский М.Л. Вентиляция рабочих мест в сварочном производстве. М.: Машиностроение. 1981г. 120 с.
5. Минко В.А., Логачев И.Н., Логачев К.И., Шаптала В.Г. и др. Обеспыливающая вентиляция. Белгород: Изд-во БГТУ. 2010. 565с.

6. Logachev I., Logachev K., Averkova O. Local Exhaust Ventilation: Aerodynamic Processes and Calculations of Dust Emissions. Boca Raton: CRC Press. 2015. 431 p.
7. Шаптала В.Г., Горлов А.С., Северин Н.Н., Гусев Ю.М. Вопросы комплексного обеспыливания производственных помещений предприятий промышленности строительных материалов // Вестник БГТУ. 2019. № 1. С. 81-85.
8. Копин С.В. Компьютерное моделирование параметров приточно-вытяжной вентиляционной системы // Безопасность труда в промышленности. 2020. № 2. С. 7–11.
9. Логачев И.Н., Логачев К.И., Аверкова О.А., Крюков И.В. Методы снижения энергоемкости систем аспирации // Новые огнеупоры. 2014. №2. С. 51-56.
10. Пухкал В.А., Суханов К.О., Гримитлин А.М. Энергосбережение в системах промышленной вентиляции // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 6. С. 156-162.
11. Гримитлин А.М., Знаменский Р.Б., Крупкин Г.Я., Луканина М.А. Исследование подавления и локализации конвективных потоков от тепловыделяющего технологического оборудования с использованием метода математического моделирования // Инженерные системы. АВОК-Северо-Запад. 2011. № 2. С. 36–40.
12. Гримитлин А.М., Позин Г.М. Вентиляция и отопление судостроительных производств // Инженерно-строительный журнал. 2013. №6. С. 7–11.
13. Уляшева В.М., Гримитлин А.М., Черников Н.А. Повышение эффективности способов очистки вентиляционных выбросов на предприятиях строительной индустрии // Вода и экология: проблемы и решения. 2018. № 4. С. 92–98.
14. Овсянников Ю.Г., Гольцов А.Б., Семенов А.С., Логачев К.И., Уваров В.А. Снижение энергопотребления вентиляционных систем через снижение энергопотребления вентиляционных систем через принудительную рециркуляцию // Огнеупоры и техническая керамика. 2017. Т. 57. № 5. С. 557–561.
15. Эльтерман В.М. Вентиляция химических производств. М.: Химия, 1980. 288с.
16. Shaptala V.V., Logachev K.I., Severin N.N., Khukalenko E.E., Gusev Yu.M. Computer Simulation of Ventilation During Electric Welding Operations // Refractories and Industrial Ceramics. 2020. Vol. 61. Pp. 463–468.
17. Zhuang J., Diao Y., Shen H. Numerical Investigation on Transport Characteristics of High-Temperature Fine Particles Generated in a Transiently Welding Process // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. Vol. 176. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121471
18. Wang H., Huang C., Liu D., Zhao F., Sun H., Wang F., Li C., Kou G., Ye. M. Fume Transports in a High Rise Industrial Welding Hall with Displacement Ventilation System and Individual Ventilation Units // Building and Environment. 2012. Vol. 52. Pp. 119-128.
19. Cao Z., Zhang C., Zhai C., Wang Y., Wang M., Zhao T., Lu W., Huang Y. Evaluation of a Novel Curved Vortex Exhaust System for Pollutant Removal // Building and Environment. 2021. Vol. 200. doi:10.1016/j.buildenv.2021.107931.
20. Zeng L., Liu G., Gao J., Du B., Lu L., Cao C., Ye W., Tong L., Wang Y. A Circulating Ventilation System to Concentrate Pollutants and Reduce Exhaust Volumes: Case Studies with Experiments and Numerical Simulation for the Rubber Refining Process // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 35. doi:10.1016/j.jobbe.2020.101984.
21. Zhang J., Wang J., Gao J., Cao C., Lu L., Xie M., Zeng L. Critical Velocity of Active Air Jet Required to Enhance Free Opening Rectangular Exhaust Hood // Energy and Buildings. 2020. Vol. 225. doi:10.1016/j.enbuild.2020.110316.

Информация об авторах

Шаптала Вадим Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий. E-mail: shaptalavadim@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Хукаленко Евгений Евгеньевич, аспирант. E-mail: jve2008@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Северин Николай Николаевич, доктор педагогических наук, профессор, нач. кафедры огневой подготовки. E-mail: belui@mvd.ru. Белгородский юридический институт им. И.Д. Путилина. Россия, 308012, Белгород, ул. Горького, д. 31.

Гусев Юрий Михайлович, аспирант, заместитель начальника кафедры огневой подготовки. E-mail: belui@mvd.ru. Белгородский юридический институт им. И.Д. Путилина. Россия, 308012, Белгород, ул. Горького, д. 31.

Поступила 06.07.2021 г.

© Шаптала В.В., Хукаленко Е.Е., Северин Н.Н., Гусев Ю.М. 2022

^{1,*}Shaptala V.V., ¹Khukalenko E.E., ²Severin N.N., ²Gusev Yu.M.¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova²Belgorod Law Institute of the Ministry of Internal Affairs named after I.D. Putilina

*E-mail: ShaptalaVadim@yandex.ru

FEATURES OF VENTILATION OF ARC WELDING WORKPLACES IN SMALL ROOMS

Abstract. It is proposed to consider the device of an integrated ventilation system that combines local exhaust ventilation of welders' workplaces and general ventilation of premises as the main direction of normalizing the parameters of the air environment when performing arc welding. When organizing ventilation of welding rooms of limited dimensions, it is necessary to have the possible effect of drift flows. It increases as a result of the joint operation of exhaust devices. The effectiveness of devices for local exhaust ventilation of welding posts is analyzed. It depends on the space-planning solutions, the relative position of the supply and exhaust devices, as well as the peculiarities of performing technological operations. For a specific example of a welding room, an optimal variant of the organization of ventilation of welding stations is found. The fields of air mobility, its temperature and concentration of harmful impurities have been calculated by the computer modeling. The factors influencing its efficiency are revealed and the combinations of influencing factors providing the maximum permissible concentration of harmful emissions in the working zones of welders are established. The conditions have been determined under which the general exchange effect of local suction is sufficient to maintain the concentration in the room at the MPC level. The results obtained can be used to develop engineering methods for calculating and optimizing ventilation devices and systems, to analyze structural and design solutions for the ventilation of electric welding industries. Investigations of the processes of propagation of welding aerosols in the production area are carried out by means of experimental measurements, as well as computer simulation using the Ansys Fluent software hydrodynamic package.

Keywords: electric arc welding, lift-and-turn exhaust devices, ventilation efficiency, computer simulation.

REFERENCES

1. Logachev I.N., Logachev K.I., Averkova O.A. Energy saving in aspiration [Energoberezhenie v aspiracii]. M: Research Center "Regular and chaotic dynamics". 2013. 504 p. (rus)
2. Grimitlin A.M. Ventilation of electric welding production. World Applied Sciences Journal. 2013. Vol. 23. No. 13. Pp. 50–54.
3. Posokhin V.N. Calculation of local exhaust from heat and gas equipment [Raschet mestnyh otosov ot teplo- i gazovydelyayushchego oborudovaniya]. M: Mechanical Engineering, 1984. 160 p. (rus)
4. Pisarenko V.L., Roginsky M.L. Ventilation of jobs in the welding industry [Ventilyaciya rabochih mest v svarochnom proizvodstve]. M: Mechanical Engineering. 1981. 120 p. (rus)
5. Minko V.A., Logachev I.N., Logachev K.I., Shaptala V.G. Dust ventilation [Obespylivayushchaya ventilyaciya]. Belgorod: izd-vo BSTU. 2010. 565 p. (rus)
6. Logachev I., Logachev K., Averkova O. Local Exhaust Ventilation: Aerodynamic Processes and Calculations of Dust Emissions. Boca Raton: CRC Press. 2015. 431 p.
7. Shaptala V.G., Gorlov A.S., Severin N.N. Issues of complex dust removal of industrial premises of building materials industry enterprises [Voprosy kompleksnogo obespylivaniya proizvodstvennyh pomeshchenij predpriyatij promyshlennosti stroitel'nyh materialov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 1. Pp. 8–85. (rus)
8. Kopin S.V. Computer simulation of the parameters of the supply and exhaust ventilation system Labor safety in industry [Komp'yuternoe modelirovanie parametrov pritochno-vytyazhnoj ventilyacionnoy sistemy]. 2020. No. 2. Pp. 7–11. (rus)
9. Logachev I.N., Logachev K.I., Averkova O.A., Kryukov I.V. Methods for reducing the energy intensity of aspiration systems [Metody snizheniya energoemkosti sistem aspiracii]. Novye ognepupory. 2014. No. 2. Pp. 51–56. (rus)
10. Pukhkal V.A., Sukhanov K.O., Grimitlin A.M. Energy saving in industrial ventilation systems. Bulletin of civil engineers [Energoberezhenie v sistemah promyshlennoj ventilyacii]. 2016. No. 6. Pp. 156–162. (rus)
11. Grimitlin A.M., Znamensky R.B., Krupkin G.Ya., Lukanina M.A. The study of suppression and localization of convective flows from fuel technological equipment using the method of mathematical modeling [Issledovanie podavleniya i lokalizacii konvektivnyh potokov ot teplovydelyayushchego tekhnologicheskogo oborudovaniya s ispol'zovaniem metoda matematicheskogo modelirovaniya]. Engineering systems. ABOK - North-west. 2011. No. 2. Pp. 36–40. (rus)
12. Grimitlin A.M., Pozin G.M. Ventilation and heating of shipbuilding industries [Ventilyaciya i otoplenie sudostroitel'nyh proizvodstv]. Civil Engineering Journal. 2013. No. 6. Pp. 7–11. (rus)

13. Ulyasheva V.M., Grimmitlin A.M., Chernikov N.A. Improving the efficiency of exhaust emission cleaning methods at the enterprises of the construction industry [Povyshenie effektivnosti sposobov ochistki ventilyacionnyh vybrosov na predpriyatiyah stroitel'noj industrii]. Water and ecology: problems and solutions. 2018. No. 4. Pp. 92–98. (rus)

14. Ovsyannikov Yu.G., Goltsov A.B., Semenenko A.S., Logachev K.I., Uvarov V.A. Reducing the energy consumption of ventilation systems through reducing the energy consumption of ventilation systems through forced recirculation [Snizhenie energopotrebleniya ventilyacionnyh sistem cherez snizhenie energopotrebleniya ventilyacionnyh sistem cherez prinuditel'nyuyu recirkulyaciyu]. Refractories and technical ceramics. 2017. Vol. 57. No. 5. Pp. 557–561. (rus)

15. Elterman V.M. Ventilation of chemical industries [Ventilyaciya himicheskikh proizvodstv]. M: Chemistry, 1980. 288 p. (rus)

16. Shaptala V.V., Logachev K.I., Severin N.N., Khukalenko E.E., Gusev Yu.M. Computer Simulation of Ventilation During Electric Welding Operations. Refractories and Industrial Ceramics. 2020. Vol. 61. Pp. 463–468.

17. Zhuang J., Diao Y., Shen H. Numerical Investigation on Transport Characteristics of High-

Temperature Fine Particles Generated in a Transiently Welding Process. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. Vol. 176. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121471

18. Wang H., Huang C., Liu D., Zhao F., Sun H., Wang F., Li C., Kou G.Ye. M. Fume Transports in a High Rise Industrial Welding Hall with Displacement Ventilation System and Individual Ventilation Units. Building and Environment. 2012. Vol. 52. Pp. 119–128.

19. Cao Z., Zhang C., Zhai C., Wang Y., Wang M., Zhao T., Lu W., Huang Y. Evaluation of a Novel Curved Vortex Exhaust System for Pollutant Removal. Building and Environment. 2021. Vol. 200. doi:10.1016/j.buildenv.2021.107931.

20. Zeng L., Liu G., Gao J., Du B., Lu L., Cao C., Ye W., Tong L., Wang Y. A Circulating Ventilation System to Concentrate Pollutants and Reduce Exhaust Volumes: Case Studies with Experiments and Numerical Simulation for the Rubber Refining Process. Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 35. doi:10.1016/j.jobbe.2020.101984.

21. Zhang J., Wang J., Gao J., Cao C., Lu L., Xie M., Zeng L. Critical Velocity of Active Air Jet Required to Enhance Free Opening Rectangular Exhaust Hood. Energy and Buildings. 2020. Vol. 225. doi:10.1016/j.enbuild.2020.110316.

Information about the authors

Shaptala, Vadim V. PhD. E-mail: shaptalavadim@yandex.ru. Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod 46, Kostyukova st.

Khukalenko, Evgeny E. Graduate student. E-mail: jve2008@yandex.ru. Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod 46, Kostyukova st.

Severin, Nikolay N. DSc, Professor. E-mail: belui@mvd.ru. Belgorod Law Institute I.D. Putilina. Russia, 308012, Belgorod 31, Gorky st.

Gusev, Yuri M. Graduate student. E-mail: belui@mvd.ru. Belgorod Law Institute I.D. Putilina. Russia, 308012, Belgorod 31, Gorky st.

Received 06.07.2021

Для цитирования:

Шаптала В.В., Хукаленко Е.Е., Северин Н.Н., Гусев Ю.М. Особенности организации вентиляции электросварочных рабочих мест в помещениях ограниченных размеров // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 1. С. 51–59. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-51-59

For citation:

Shaptala V.V., Khukalenko E.E., Severin N.N., Gusev Yu.M. Features of ventilation of arc welding workplaces in small rooms. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 1. Pp. 51–59. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-51-59

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-60-69

^{1,*}Коренькова Г.В., ¹Митякина Н.А., ²Белых Т.В., ²Дорохова Е.И.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова²Белгородский государственный национальный исследовательский университет

*E-mail: G-korenkova@yandex.ru

ФОРМИРОВАНИЕ РЕНОВАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ЖИЛОЙ ЗАСТРОЙКИ В РОССИЙСКИХ ГОРОДАХ

Аннотация. Реновационные процессы в части жилищного фонда крупных, больших и малых городов России сформировались на фоне ухудшения физического и морального состояния жилых зданий постройки прошлого века. Основные задачи приведенного аналитического исследования – расширение знаний об исторических предпосылках зарождения реновационных процессов, формирование доказательной базы эффективности комплексного развития территорий, отвечающих современным требованиям к городской среде (на примере города Белгорода).

Рассмотрен российский, на примере Москвы, и исторический опыт реновации жилой застройки европейских и азиатских государств. Обозначена специфика мероприятий, обеспечивающих комплексное развитие депрессивных территорий города Москвы.

Изучены законодательные документы, способствующие развитию жилищного строительства второй половины XX века, и современное законодательство о всероссийской реновации жилой застройки. Рассмотрены перспективы реализации реновационных процессов на территории города Белгорода. Определены организационные и технические аспекты комплексного развития жилого пространства областного центра. Оценены первые шаги реновационных процессов в части жилой застройки. Приведены примеры реализации развития застроенных территорий города, изложены доступные сценарии обновления жилых кварталов. Проанализировано физическое и моральное состояние домов средней этажности первых массовых серий. Определены возможные мероприятия реконструкции жилого фонда застройки 60-х годов прошлого века. Представлены варианты развития реновационных процессов жилой застройки.

Ключевые слова: реновация, жилой фонд, комплексное развитие территорий, физический износ, моральный износ, реконструкция.

Введение. В архитектурно-строительной практике России в последнее десятилетие появился и закрепился термин «реновация». В переводе с латыни – возобновление, обновление, восстановление.

Как и многие процессы в нашей стране, реновация жилой застройки, так необходимая большинству городов, началась в Москве. Выработка решений на стадии подготовки и начала осуществления реновации в столице вызвала много трудностей. Осуществление процесса обновления застройки жилых районов стало предметом острой дискуссии в среде специалистов и жителей данных территорий. Однако, несмотря на это, программа активно реализуется и дает положительные результаты [1].

Основанием для реализации процесса реновации в Москве стал Федеральный закон от 01.07.2017 г. № 141-ФЗ «О внесении изменений в Закон Российской Федерации «О статусе столицы Российской Федерации» и отдельные законодательные акты Российской Федерации в части установления особенностей регулирования отдельных правоотношений в целях реновации жилищного фонда в субъекте Российской Федерации – городе федерального значения Москве». Данный

закон вносит дополнения в Закон Российской Федерации от 15 апреля 1993 года № 4802-1 «О статусе столицы Российской Федерации» [2]. В частности, он дополняется абзацем следующего содержания: «определяют содержание программы реновации жилищного фонда в городе Москве (далее также – программа реновации). При этом под реновацией жилищного фонда в городе Москве (далее также – реновация) понимается совокупность мероприятий, выполняемых в соответствии с программой реновации жилищного фонда в городе Москве, направленных на обновление среды жизнедеятельности и создание благоприятных условий проживания граждан, общественного пространства в целях предотвращения роста аварийного жилищного фонда в городе Москве, обеспечения развития жилых территорий и их благоустройства. Программа реновации устанавливает очередность сноса многоквартирных домов, включенных в программу реновации. Очередность сноса указанных многоквартирных домов определяется с учетом их технического состояния». Из цитаты следует, что реновационные мероприятия направлены на снос жилых домов и возведение на освободившихся территориях современных жилых массивов. Для

реализации данной программы был создан Московский фонд реновации жилой застройки [3].

Неизбежность осуществления реновации вполне предсказуема, так как, с одной стороны, существует реальная угроза пространственной и социальной деградации территорий жилищной застройки и потеря престижа в общегородском контексте, а с другой – практически закономерный процесс развития морального и физического износа строений [4].

Очевидно, что каждый субъект РФ, занимаясь вопросами реновации жилищного фонда и территорий, принимает программу, соответствующую определенным условиям. Программа реновации жилищного фонда в столице не является актуальной для большинства городов России. Вероятно, для них более реально использование «немецкого опыта», направленного на реконструкцию жилых домов, так как необходимо объективно оценивать финансовые и технические возможности отдельно взятого города [5].

Материалы и методы. Основными методами проведенного аналитического исследования является обзор отечественного и зарубежного опыта реновации жилых зданий сложившейся застройки и изучение информации о реализации комплексного развития территорий. Объект исследования – социальная инфраструктура, сформировавшаяся в жилищной сфере крупных городов России. Цель анализа – оценка существующей практики повышения качества и комфорта городской среды в районах с накопленной за предыдущие десятилетия диспропорцией развития жилищного фонда. Основные задачи исследования – расширение знаний об исторических предпосылках зарождения реновационных процессов, формирование доказательной базы эффективности комплексного развития территорий, отвечающих современным требованиям к городской среде (на примере города Белгорода).

Процесс обновления районов жилой застройки начался не в 2017 году в Москве, а гораздо раньше в крупных и небольших городах стран Европы, Китая, Японии и других странах мира. На данный период времени накоплен значительный мировой опыт реновации жилья. Каждое государство выбирало свой путь преобразования жилищного фонда с учетом специфики застройки, национальных традиций и особенностью поставленных задач.

Одним из первых проектов реконструкции принято считать обновление Парижа в третьей четверти XIX века, определившее во многом современный облик города. Градостроительные мероприятия, проведенные в столице Франции,

привели к существенному улучшению инфраструктуры города и явились образцом для подражания в других городах мира.

Во Франции современная программа реконструкции и модернизации жилищного фонда в основном завершилась в начале 1990 годов. Реконструкция проведена для «домов умеренной стоимости», составляющих около 15 % жилищного фонда Франции. Специфика французских проектов реновации состоит в том, что они направлены на повышение энергетической эффективности, замену и модернизацию технического оборудования, благоустройство общественных зон и жилых территорий. Помимо этого, французские специалисты решали задачи, связанные с увеличением площади каждой квартиры: как путем возведения пристроек, так и сокращения общего числа квартир дома.

Гораздо раньше по времени (1949 год) и значительнее по объемам вложения денежных средств началась программа реновации ветхого и аварийного жилья в Пекине. Таким образом, китайская столица уже почти 70 лет занимается вопросами реновации, постоянно наращивая объемы капитальных вложений. Например, в 2017 году на данную программу было выделено 4,5 миллиарда долларов, что на 60 % превысило показатель предыдущего года [6].

В определенный период времени, примерно с середины прошлого века, для преодоления жилищного кризиса на Западе возводились типовые жилые дома. Постройки того периода изменили внешний вид небольших уютных и эстетически цельных европейских городов к худшему. Естественно, что со временем возникла необходимость изменить облик и формат таких строений, как морально устаревших и не отвечающих требованиям современной городской жизни [7].

Страны западной Европы в середине 90-х годов в основном завершили процесс реабилитации возведенных по типовым проектам четырех-, пятиэтажных жилых домов из сборных железобетонных конструкций с высоким уровнем заводской готовности.

Рассматривая опыт европейских стран в части реновации жилой застройки, можно констатировать, что для нашей страны особый интерес представляет практика модернизации жилищного фонда, накопленная Германией: за период пребывания советских воинских частей в военных городках были возведены жилые дома по проектам, аналогичным советским, которые к 1990 году уже не соответствовали нормативно-техническим требованиям и нуждались в проведении реконструктивных работ. В стране существовали проблемы, связанные с несовершен-

ством законодательной базы, неэффективной системой управления и отсутствием средств на проведение данных работ. В процессе проведения реформ были внесены дополнения и изменения в ранее действующие законы в Восточной Германии, которые четко разграничивали права собственности. В конечном итоге данные решения способствовали привлечению инвестиционных ресурсов в жилищную сферу [7].

Изучая характерные особенности реновации жилья в разных странах и сравнивая их с российскими разработками, следует отметить специфику проведения реконструкции жилого фонда постройки 50-60-х годов в Москве. Она осуществляется под влиянием совершенно иных факторов и условий. Основная направленность программы московской реновации – увеличение высоты жилой застройки, за счет чего окупаются расходы на реализацию самой программы, но при этом нарушается привычная застройка и инфраструктура района. Вместо пятиэтажек город получает новые высотки.

Необходимость реновации жилых районов в городах России бесспорна. Для лучшего понимания следует обратиться к истории развития жилищного строительства, начиная с середины прошлого века. Именно в этот период сделан первый шаг к развитию массового строительства жилья. Для этого были вполне понятные причины, связанные с последствиями Великой Отечественной войны. Большая часть городов европейской части страны была разрушена. А с учетом печального положения, связанного с огромным дефицитом жилых площадей, к началу сороковых годов резкое увеличение строительства жилья было очень актуально.

Ключевую роль в решении жилищной проблемы сыграло принятое в 1957 г. Постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР «О развитии жилищного строительства в СССР». На основании этого постановления был введен новый жилищный стандарт, суть которого состояла в переходе от покомнатного (коммуналки) к поквартирному расселению семей. С постановления 1957 года и новой редакции СНиП начался период по-настоящему массового строительства типового жилья по всей территории СССР. Острота жилищной проблемы тогда была столь велика, что переход к новому стандарту стал возможен только на базе максимальной экономичности объемно-планировочных решений квартир и домов при крайне аскетичных архитектурно-композиционных решениях. В то же время, здания возводились из капитальных огнестойких и долговечных конструкций. В итоге новые дома

были предельно просты, дешевы и функциональны, строились по типовым сериям, чаще всего были 5-этажными.

Истекшие десятилетия принесли существенную переоценку данной застройки. В период ее осуществления она формировала окраинные спальные районы быстро развивающихся городов. В настоящее время – это 4-, 5-этажное кольцо, окружающее исторические центры городов. Значительная часть эксплуатируемых зданий данной застройки не соответствует современным функционально-потребительским требованиям, предъявляемым к жилым помещениям (неудобная планировка, недостаточный уровень благоустройства, низкие теплотехнические, акустические и другие характеристики ограждающих конструкций).

Параллельно с принятием в 2017 году программы реновации жилищного фонда в городе Москве комитет Госдумы по жилищной политике и ЖКХ рассматривал возможность распространения московского опыта на другие регионы России. В декабре 2020 года Госдума приняла Федеральный закон № 494-ФЗ «О внесении изменений в Градостроительный кодекс Российской Федерации и отдельные законодательные акты Российской Федерации в целях обеспечения комплексного развития территорий», проще говоря, закон о всероссийской реновации [2]. Исходя из содержания принятого закона, комплексное развитие территорий (КРТ) – это развитие городских пространств, в ходе которого будут сносить существующие дома и на их месте строить новые. Теоретически КРТ может проходить и без сноса домов – путем их реконструкции.

Изучая содержание данного закона, можно понять, что речь идет о глобальном обновлении кварталов и даже микрорайонов с возведением жилых комплексов с благоустроенной территорией и созданием всей инфраструктуры: поликлиники, школы, детские сады, дороги. В этом документе под реновацией понимается не только снос жилья, но и его реконструкция и модернизация с применением энергоэффективных технологий. Особенность положений данного закона состоит еще и в том, что помимо ветхого и аварийного жилья в программу комплексного освоения территорий могут включаться и неаварийные дома. Разработчики закона сделали акцент на том, что большинство вопросов должны урегулировать региональные власти, а значит, ситуация может различаться в разных субъектах РФ и даже муниципальных образованиях.

Рассматривая перспективы реализации закона о всероссийской реновации в Белгороде, необходимо проанализировать фонд многоквартирных

тирных жилых домов, сложившийся к настоящему моменту. Нужно отметить, что в городе, начиная с послевоенного периода, достаточно стабильно велось строительство многоквартирных жилых домов (табл. 1).

Главная проблема Белгорода в 50-х годах – жилищная. Образование Белгородской области в 1954 году послужило толчком к развитию строительства в регионе, в том числе и жилищного. В этот период динамично развивалась производственная база строительной отрасли, были введены в эксплуатацию четыре завода железобетонных изделий и конструкций [8].

В послевоенный период в первую очередь велись работы по восстановлению и реконструк-

ции довоенного фонда. С 1951 г. началась застройка новых кварталов в центральной части города двухэтажными и трехэтажными жилыми домами, а с 1957 года началось возведение первых пятиэтажных домов. Массовое строительство зданий такого типа пришлось на начало 1960-х годов. Ежегодный ввод жилых площадей в 60-70-е годы составлял порядка 100 тыс. кв. м. В современном жилом фонде Белгорода 5-ти этажная застройка остается значительной [9]. Решив ряд задач своего времени (быстрое возведение, обеспечение жильем), данные типы жилых зданий, сохранившихся и эксплуатируемых сегодня, признаны не отвечающим современным требованиям.

Таблица 1

Статистика общего числа построенных жилых домов в Белгороде по годам

Год постройки	Суммарная площадь	Число домов	Количество квартир	Жилая площадь
2010-2019	1245133,14 м ²	133	13242	813808,98 м ²
2000-2009	2603216,39 м ²	248	28158	1796495,57 м ²
1990-1999	2112787,16 м ²	213	23326	1590215,63 м ²
1980-1989	1940529,43 м ²	190	28048	1467306,18 м ²
1970-1979	1554634,26 м ²	333	23908	1146380,23 м ²
1960-1969	1058264,92 м ²	334	16736	769932,96 м ²
1950-1959	165634,53 м ²	151	1699	121305,20 м ²

Улучшение качественных характеристик жилого фонда, создаваемого в последние десятилетия, способствует предъявлению повышенных требований к жилью, возведенному во второй половине XX века, в отношении его технического состояния и с точки зрения благоустройства. По степени износа жилой фонд г. Белгорода распределяется следующим образом: – до 30 % – 62,7 %, от 30 до 60 % – 37,1 %, свыше 60 % – 0,2 %.

Отправной точкой в осуществлении реновации жилых территорий стало Постановление администрации города Белгорода от 15 августа 2007 года № 113 «О развитии застроенных территорий города Белгорода». Анализ сложившейся жилой застройки позволил выявить проблемные жилые территории [10]. В Постановлении был определен перечень застроенных территорий, состоящий из семи позиций, подлежащих развитию. Реконструкция малоценного жилого фонда началась в центральной части города. Плановая реновация осуществляется за счет высвобождения территорий ветхого (106 тыс. кв. м в настоящее время) и ветшающего жилого фонда – всего порядка 220 тыс. кв. м с последующей застройкой, согласно градостроительному регламенту района реконструкции [11].

Один из флагманских проектов – застройка в границах кварталов по ул. Попова – пр. Белгородский – ул. Н. Островского – Центральный парк. Жилой комплекс «Центр Парк» возводится на площади 5,7 гектара. ЖК представляет собой разносекционные монолитно-каркасные здания. Строительство реализовано по принципам комплексного устойчивого развития территории: современные многоквартирные дома были построены взамен аварийного двухэтажного жилья послевоенной постройки (рис. 1). Проект подразумевает современный подход к созданию качественной городской среды (рис. 2).

В границах центральной части города, квартал пр. Б. Хмельницкого – ул. Парковая – ул. Шевченко, заканчивается строительство ЖК «Парковый». Это жилой комплекс повышенной комфортности, сочетающий в себе основные принципы современного городского квартала: эргономичность дворовых территорий и лаконичность архитектурных форм (рис. 3). В развитие реконструкции данной территории в июле этого года архитектурно-градостроительный совет рассмотрел концепцию реновации рядом расположенных кварталов в границах пр. Б. Хмельницкого и пр. Белгородского. Строительство жилых помещений запланировано в рамках развития застроенной территории площадью 6,6 га.

Масштабность территорий в границах элементов планировочной структуры или их частей, подлежащих развитию, соизмерима с площадью застройки Белгорода. Но с другой стороны заметно меняется внешний архитектурный облик

сложившейся застройки. Практически исчезает исторический и культурный слой в застройке центра города [12].



Рис. 1. Застройка квартала по ул. Попова – ул. Н. Островского до реконструкции территории
[<https://sanchess-city31.livejournal.com/22784.html>]



а



б

Рис. 2. Жилой комплекс «Центр Парк»:
а – архитектурная визуализация застройки; б – строящийся жилой комплекс
[https://vnrg.ru/projects/active_projects/zhiloy-kompleks-tsentr-park/]



Рис. 3. Макет жилого комплекса «Парковый»
[<https://www.1-линия.рф/2017-11-03-18-16-18/8-frontpage/216-2017-09-19-22-29-17.html>]

Свято-Троицкий квартал примечателен тем, что именно это место изначально является историческим центром Белгорода, а в послевоенный период на этой территории возводились одни из первых многоквартирных малоэтажных жилых домов. Прилегающая к кварталу застройка общественными и жилыми зданиями формировалась в тот же период. В настоящее время архитектурно-пространственный комплекс, возведенный в 50-е годы прошлого века – депрессивная территория. Жилые дома составляющие большую часть данной застройки признаны аварийными [13, 14].

Квартал в пределах пр. Славы – ул. 50-летия Белгородской области – Свято-Троицкого бульвара – пр. Б. Хмельницкого включен в перечень застроенных территорий, подлежащих развитию. Администрацией Белгорода проводились конкурсы проектов жилых комплексов, вписываемых в самый центр города, между зданием правительства области и местом, где до 1920-х годов находился Троицкий собор, на территории третьей Белгородской крепости. Разработчики предложили комплексы многоэтажных жилых зданий с устройством общественного пространства. При всем этом однозначного решения о функциональном назначении данного места пока не принято, так как историки выступают за создание музея, который рассказал бы жителям о прошлом города, белгородцы хотели бы видеть здесь рекреационную зону. Вместе с тем, очевидно, что эта территория имеет высокий коммерческий потенциал, а привлечение инвесторов серьезно снизит нагрузку на бюджет и поможет быстрее реализовать общий проект развития квартала.

Есть еще один пласт жилищного фонда, который нужно рассматривать в связи с вопросом развития застроенных территорий.

Значительная часть современного жилого фонда Белгорода, как и большинства городов России, состоит из домов средней этажности первых массовых серий. Данные жилые массивы застроены домами со стенами из кирпича и крупных панелей с нормативным сроком службы 50-100 лет. Постройки, эксплуатируемые более 50 лет, имеют физический и моральный износ. Изначально предполагалось, что кирпичные дома могут быть подвергнуты реконструкции. В настоящее время несущие конструкции зданий имеют физический износ менее 60%. Срок службы панельных домов может быть продлен своевременным ремонтом. Но технологий глубокой их реконструкции, способных кардинально увеличить срок службы, пока не существует. На стадии разработки проектов панельных жилых зданий реконструкция не предусматривалась [15, 16].

В современных условиях реновация данной застройки может выполняться в виде реконструкции жилых домов с кирпичными стенами, что отражено в Федеральном законе № 494-ФЗ от 30.12.2020. Жилые здания, которые в момент постройки удовлетворяли предъявляемым требованиям, по прошествии некоторого периода устарели и требуют совершенствования. Недостатками рассматриваемых строений являются наличие проходных комнат в квартирах, совмещенный санузел, маленькая прихожая, небольшая площадь кухни и небольшое число трехкомнатных квартир, а также большая часть квартир имеет ориентацию на одну сторону света. Реконструкция зданий в данном случае относится к форме расширенного воспроизводства и направлена на снижение физического и морального износа путем замены конструктивных элементов и систем инженерного оборудования, установки дополнительного оборудования, изменения объемно-планировочных характеристик, включая объем здания и его назначение.

Генеральным планом развития городского округа «Город Белгород» до 2025 года предполагается проведение выборочной реконструкции морально и физически устаревших отдельных домов, групп жилых домов, кварталов. Конкретная реализация работ в этом направлении представляется в следующем виде:

- проведение инвентаризации и оценки состояния всего жилого фонда группы домов, квартала на местности;

- по материалам обследования составление проекта строительного зонирования, где в составе проекта застройки определяется судьба каждого дома района проектирования (снос, капитальный ремонт, реконструкция, замена отдельных конструктивных элементов, модернизация и т.д.). В генплане эти районы предварительно выделены как «территории возможной реновации по возможности и необходимости» [17].

В первую очередь в генеральном плане развития Белгорода рассматриваются микрорайоны многоэтажной жилой застройки, расположенной в северной части города (восточнее пр. Б. Хмельницкого и севернее ул. Студенческая), построенные в 50-, 60-е годы прошлого века. Данные территории проектом генерального плана условно названы инновационной зоной. На этой территории предлагается проведение масштабных работ по изучению состояния каждого жилого здания, достигшего физического и морального износа [17]. Работы такого плана пока не проводились, но жилые дома первых массовых серий капитально ремонтируются, согласно долгосрочной адресной программе проведения капитального ремонта общего имущества в многоквартирных

домах в Белгородской области на 2015-2044 годы.

Выводы. Обзор мирового опыта по реконструкции и модернизации жилищного фонда позволяет сделать следующие заключения:

- в развитых европейских странах массовая модернизация сложившейся застройки началась в 1970-е годы и практически она завершилась к середине 1990 годов. Страны Западной Европы, такие как Франция, Германия, Англия, Финляндия, накопили богатый опыт по реконструкции крупнопанельного жилья;

- снос жилищного фонда из крупнопанельных жилых домов первых массовых серий не осуществляли ни в одной стране мира;

- источниками финансирования работ по реконструкции жилья являются как государственный бюджет и средства инвесторов, так и средства жильцов модернизируемых домов;

- опыт европейских стран последних десятилетий свидетельствует о том, что без активного участия государства проблемы реновации жилищного фонда решить не удастся.

Проведенный анализ структуры жилого фонда Белгорода, его состояние и проводимые работы по его обновлению доказывают, что в городе выполняются работы, направленные на обеспечение комплексного развития отдельных территорий. Реконструкция объектов недвижимости жилого сектора как никогда актуальна и к ним необходим дифференцированный подход.

Обновление жилищного фонда в Белгороде может проходить по одному из трёх сценариев:

- снос и возведение на участке земли нового дома;

- капитальная реконструкция;

- снос со сменой целевого использования освободившейся земли.

Основным компонентом осуществления данных сценариев является финансирование. Запуск программы комплексного развития территорий бесспорно сможет активизировать процессы реновации [18].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мозгоев А.М., Кузьмичева К.И. Реновация жилищного фонда города Москвы // Вестник Московского университета имени С.Ю. Витте. 2017. №4 (23). С. 70–74.

2. Градостроительная деятельность и архитектура. Нормативно-правовое регулирование [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: <http://www.minstroyrf.ru/trades/gradostroitel'naya-deyatelnost-i-arhitektura/>. pdf (дата обращения: 26.04.2021)

3. Прохорова Е.А. О реализации программы реновации в городе Москве // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». 2019. №3. С. 37–44.

4. Кострикин П.Н. Проблемы эффективности реализации государственных (муниципальных) программ обновления жилищного фонда // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 11 (110). С. 1221–1228.

5. Владимирова И.Л., Фокин А.Э. Внедрение механизма государственно-частного партнерства жилого фонда // Российское предпринимательство. 2015. Т. 16. №6. С. 887–902.

6. Хейфец Е.Е. Жилищные реформы и реновация жилого фонда в Китае. Опыт для России // Имущественные отношения в Российской Федерации. 2019. №2 (209). С. 18–28.

7. Прохорова Е.А. Зарубежный опыт реализации проектов реновации жилой застройки // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». 2019. №3. С. 45–53.

8. Коренькова Г.В., Митякина Н.А., Черныш Н.Д. Градостроительная концепция развития и преобразования городской среды Белгорода // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Градостроительство: сб. статей [Электронный ресурс]. Самарский государственный архитектурно-строительный университет. 2015. С. 130–135.

9. Попова Е.Ю. Типология жилищного фонда города Белгорода // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. №12. С. 73–82.

10. Вестник нормативных правовых актов Белгородской области [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: <http://www.zakon.belregion.ru.pdf> (дата обращения: 18.04.2021)

11. Соловьев А.Б., Полякова Т.А., Богат Д.В., Сазонова Н.В. Социально-экологическая оценка качества жилой застройки г. Белгорода // Проблемы региональной экологии. 2013. №4. С. 211–214.

12. Коренькова Г.В., Митякина Н.А. Архитектурно-градостроительные проблемы реконструкции исторического центра Белгорода // Путь науки. 2017. №12 (46). С. 15–16.

13. Коренькова Г.В., Митякина Н.А., Черныш Н.Д. Возрождение исторического облика центрального квартала Белгорода // Культурно-историческое наследие строительства: вчера, сегодня, завтра: сб. материалов международной научно-практической конференции. Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова. 2014. С. 48–53.

14. Свято-Троицкий бульвар [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: <https://sanchess->

city31.livejournal.com/78122.html. pdf (дата обращения 15.05.2021)

15. Черныш Н.Д., Коренькова Г.В., Митякина Н.А. Тенденции определения стратегии капитального ремонта и реконструкции городского жилого фонда // Проблемы инновационного биосферно-совместимого социально-экономического развития в строительном, жилищно-коммунальном и дорожном комплексах: сб. материалов IV международной научно-практической конференции в 2-х томах. Т.2. Брянский государственный инженерно-технологический университет. 2015. С. 175–180.

16. Реконструкция и обновление сложившейся застройки города / под. общей редакцией

профессора Грабового П.Г. и профессора Харитонов В.А. М.: Изд-ва «АСВ» и «Реалпроект», 2005. 624 с.

17. Генеральный план развития городского округа «Город Белгород» до 2025 года. Положение о территориальном планировании [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: <https://docs.cntd.ru/document/550205838>. pdf (дата обращения: 2.06.2021)

18. Сайт органов местного самоуправления города Белгорода [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: <http://www.beladm.ru/o-belgorode/>. pdf (дата обращения: 28.04.2021).

Информация об авторах

Коренькова Галина Викторовна, доцент кафедры архитектурных конструкций. E-mail: G-korenkova@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Митякина Наталья Анатольевна, кандидат технических наук, доцент кафедры архитектурных конструкций. E-mail: natmit2010@bk.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Белых Татьяна Владимировна, кандидат социологических наук, доцент кафедры социальных технологий и государственной службы. E-mail: belikhtv@yandex.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, д. 85.

Дорохова Елена Ивановна, кандидат экономических наук, доцент кафедры мировой экономики. E-mail: dorokhova@bsu.edu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, д. 85.

Поступила 08.09.2021 г.

© Коренькова Г.В., Митякина Н.А., Белых Т.В., Дорохова Е.И., 2022

^{1,*}Korenkova G.V., ¹Mityakina N.A., ²Belikh T.V., ²Dorokhova E.I.

¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

²Belgorod State National Research University

*E-mail: G-korenkova@yandex.ru

FORMATION OF RENOVATION PROCESSES OF RESIDENTIAL BUILDINGS IN RUSSIAN CITIES

Abstract. The renovation of the housing stock in large and small cities of Russia is formed due to the deterioration of the physical and moral condition of residential buildings of the last century. The main tasks of the study are to expand knowledge about the historical prerequisites of the origin of renovation processes, to form an evidence base for the effectiveness of the integrated development of territories that meet modern requirements for the urban environment (using the example of the Belgorod city). Russian and historical experience of renovation of residential buildings of European and Asian states are considered on the example of Moscow. The specifics of measures ensuring the comprehensive development of the depressed territories of Moscow are indicated. Legislative documents promoting the development of housing construction in the second half of the 20th century and modern legislation on the All-Russian renovation of residential buildings have been studied. Prospects of renovation processes implementation in Belgorod are considered. Organizational and technical aspects of the complex development of the residential space of the regional center have been determined. The first steps of renovation processes in the part of residential development are evaluated. Examples of the implementation of the development of built-up areas of the city are given, available scenarios for the renewal of residential areas are outlined. The physical and moral condition of medium-rise houses of

the first mass series is analyzed. Possible measures for the reconstruction of the housing stock of the development of the 60s of the last century have been identified. Options for development of renovation processes of residential development are presented.

Keywords: renovation, housing stock, complex development of territories, physical wear and tear, moral wear and tear, reconstruction.

REFERENCES

1. Mozhgov A.M., Kuzmicheva K.I. Renovation of the housing stock of Moscow [Renovatsiya zhilishchnogo fonda goroda Moskvy]. Bulletin of Moscow University named after S.Yu. Witte [Vestnik Moskovskogo universiteta imeni S.Yu. Vitte]. 2017. No. 4 (23). Pp. 70–74. (rus)
2. Urban planning and architecture. Regulation [Gradostroitel'naya deyatel'nost' i arhitektura. Normativno-pravovoe regulirovanie]. AdobeAcrobatReader. URL: <http://www.minstroyrf.ru/trades/gradostroitel'naya-deyatelnost-i-arhitektura/>. pdf (date of treatment: 26.04.2021)
3. Prokhorova E.A. On the implementation of the renovation program in Moscow [O realizacii programmy renovatsii v gorode Moskve]. International journal of applied sciences and technologies «Integral». 2019. No. 3. Pp. 37–44. (rus)
4. Kostrikin P.N. Efficiency problems of the implementation of state (municipal) housing renewal programs [Problemy effektivnosti realizacii gosudarstvennyh (municipalnyh) programm obnoveniya zhilishchnogo fonda]. Vestnik MGSU. 2017. Vol. 12. Out. 11 (110). Pp. 1221–1228. (rus)
5. Vladimirova I.L., Fokin A.E. Implementation of the mechanism of public-private partnership of housing stock [Vnedrenie mekhanizma gosudarstvenno-chastnogo partnerstva zhilogo fonda]. Russian Journal of entrepreneurship. 2015. Vol. 16. No. 6. Pp. 887–902. (rus)
6. Heifets E.E. Housing reforms and renovation of housing stock in China. Experience for Russia [Zhilishchnye reformy i renovatsiya zhilogo fonda v Kitae. Opyt dlya Rossii]. Property relations in the Russian Federation [Imushchestvennye otnosheniya v Rossijskoj Federacii]. 2019. No. 2 (209). Pp. 18–28. (rus)
7. Prokhorova E.A. Implementation of residential renovation projects in foreign countries [Zarubezhnyj opyt realizacii proektov renovatsii zhiloz zastrojki]. International journal of applied sciences and technologies «Integral». 2019. No. 3. Pp. 45–53. (rus)
8. Korenkova G.V., Mityakina N.A., Chernysh N.D. Urban planning concept of the development and transformation of the urban environment of Belgorod [Gradostroitel'naya koncepciya razvitiya i preobrazovaniya gorodskoj sredy Belgoroda]. Traditions and innovations in construction and architecture. Urban planning [Tradicii i innovacii v stroitelstve i arhitekture. Gradostroitelstvo]. Samara State University of Architecture and Construction. 2015. Pp. 130–135. (rus)
9. Popova E.Yu. Typology of housing stock in Belgorod city [Tipologiya zhilishchnogo fonda goroda Belgoroda]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 12. Pp. 73–82. (rus)
10. Bulletin of regulatory legal acts of the Belgorod region [Vestnik normativnyh pravovyh aktov Belgorodskoj oblasti]. AdobeAcrobatReader. URL: <http://www.zakon.belregion.ru>. pdf (date of treatment: 18.04.2021)
11. Soloviev A.B., Polyakova T.A., Bogat D.V., Sazonova N.V. Socio-ecological assessment of the quality of residential areas in Belgorod city [Socialno-ekologicheskaya ocenka kachestva zhiloz zastrojki g. Belgoroda]. Regional environmental issues. 2013. No. 4. Pp. 211–214. (rus)
12. Korenkova G.V., Mityakina N.A. Architectural and town-planning problems of reconstruction of the historic center of Belgorod [Arhitekturno-gradostroitelnye problemy rekonstrukcii istoricheskogo centra Belgoroda]. The Way of Science. 2017. No. 12 (46). Pp. 15–16. (rus)
13. Korenkova G.V., Mityakina N.A., Chernysh N.D. Revival of the historical appearance of the central quarter of Belgorod [Vozrozhdenie istoricheskogo oblika centralnogo kvartala Belgoroda]. Cultural and historical heritage of construction: yesterday, today, tomorrow [Kulturno-istoricheskoe nasledie stroitelstva: vchera, segodnya, zavtra]. International scientific and practical conference. Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov. 2014. Pp. 48–53. (rus)
14. Holy Trinity Boulevard [Holy Trinity Boulevard]. AdobeAcrobatReader. URL: <https://sanchess-city31.livejournal.com/78122.html>. pdf (date of treatment: 15.05.2021)
15. Chernysh N.D., Korenkova G.V., Mityakina N.A. Trends in determining the strategy for the overhaul and reconstruction of urban housing [Tendencii opredeleniya strategii kapitalnogo remonta i rekonstrukcii gorodskogo zhilogo fonda]. Problems of innovative biosphere-compatible socio-economic development in construction, housing, communal and road complexes [Problemy innovacionnogo biosferno-sovmestimogo socialno-ekonomicheskogo razvitiya v stroitelnom, zhilishchno-kommunalnom i dorozhnom kompleksah]. IV International Scientific and Practical Conference in 2 volumes. Vol. 2. Bryansk State University of Engineering and Technology. 2015. Pp. 175–180. (rus)

16. Grabovoy P.G., Kharitonov V.A. Reconstruction and renewal of the existing development of the city [Rekonstrukciya i obnovlenie slozhivshejsya zastrojki goroda]. Moskva: «DIA» and «Realproject», 2005. 624 p. (rus)

17. Master plan for the development of the city district «City of Belgorod» until 2025. Territorial planning provision [Generalnyj plan razvitiya gorodskogo okruga «Gorod Belgorod» do 2025 goda.

Polozhenie o territorialnom planirovanii]. AdobeAcrobatReader. URL: <https://docs.cntd.ru/document/550205838.pdf> (date of treatment: 2.06.2021)

18. Site of local governments of the city of Belgorod. AdobeAcrobatReader. URL: <http://www.beladm.ru/o-belgorode/>. pdf (date of treatment: 28.04.2021).

Information about the authors

Korenkova, Galina V. Assistant professor. E-mail: G-korenkova@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova st., 46.

Mityakina, Natalya A. PhD, Assistant professor. E-mail: natmit2010@bk.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova st., 46.

Belikh, Tatiana V. PhD, Assistant professor. E-mail: belikhtv@yandex.ru. Belgorod State National Research University. Russia, 308015, Belgorod, Pobedy st., 85.

Dorokhova, Elena I. PhD, Assistant professor. E-mail: dorokhova@bsu.edu.ru. Belgorod State National Research University. Russia, 308015, Belgorod, Pobedy st., 85.

Received 08.09.2021

Для цитирования:

Коренькова Г.В., Митякина Н.А., Белых Т.В., Дорохова Е.И. Формирование реновационных процессов жилой застройки в российских городах // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 1. С. 60–69. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-60-69

For citation:

Korenkova G.V., Mityakina N.A., Belikh T.V., Dorokhova E.I. Formation of renovation processes of residential buildings in russian cities. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 1. Pp. 60–69. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-60-69

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-70-82

Петухова Н.М.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: tata8nina@yandex.ru

ИНТЕГРАЦИЯ ПЕРВЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ВОКЗАЛОВ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА В ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫЙ КОНТЕКСТ ГОРОДА

Аннотация. Объектами исследования являются первые железнодорожные вокзалы Санкт-Петербурга: Царскосельский (1836), Николаевский (1851, ныне Московский) Варшавский (1853), Петергофский (1853-1857, ныне Балтийский), сформировавшие первый железнодорожный узел в России. Данные вокзалы рассматриваются с точки зрения их размещения в градостроительной структуре города.

Применен метод сравнительного анализа с привлечением источников по размещению первых железнодорожных вокзалов в городах с другой градостроительной структурой. Данный метод позволил выявить основные тенденции и принципы размещения первых железнодорожных вокзалов в середине XIX века и определить особенности размещения Санкт-Петербургских вокзалов. В основу метода положено рассмотрение вокзала как составляющей градостроительной системы «вокзал-город». При этом выявляются и анализируются как общие факторы, определяющие содержание и направленность векторов взаимодействия элементов этой системы, так и особенности, обусловленные градостроительным контекстом каждого из вокзалов Санкт-Петербурга.

В результате исследования выявлены основные принципы интеграции первых вокзалов в градостроительную структуру Санкт-Петербурга. Показаны векторы взаимодействия города и вокзала: влияние сложившейся планировочной схемы города на размещение вокзалов и значение вокзалов в последующем изменении и развитии градостроительного контекста.

Ключевые слова: первые вокзалы Санкт-Петербурга, градостроительная структура, взаимодействие вокзала и города, основные тенденции размещения первых вокзалов железных дорог, первый железнодорожный узел России.

Введение. Середина XIX века отмечена глобальными изменениями в градостроительной структуре городов, ключевую роль в которых, помимо бурно развивающегося промышленного производства, играло появление железных дорог и их вокзалов. Железные дороги врезались в сложившуюся историческую ткань города, определяя новые границы и систему районирования, а также зоны наиболее активного развития в районе расположения их вокзалов и вдоль трасс, внося серьезные корректировки в градостроительную структуру исторических городов. В настоящее время при разработке генеральных планов городов и поселений, определяющих перспективы их развития, трассы железных дорог являются одними из основных составляющих градостроительного каркаса.

Включение вокзалов в общий контекст города поставило перед архитекторами сложные задачи по выработке их типологии и созданию художественного образа, отражающего их функцию, а также поиску принципов и методов интеграции нового типа здания в сложившуюся градостроительную среду.

Изменившиеся к настоящему времени требования градостроительного контекста, связанные с технологическими, функциональными, социально-экономическими, транспортными и дру-

гими факторами, вызывают необходимость переосмысления части вокзалов с отказом от железнодорожной функции (музей Орсе в Париже, Варшавский вокзал в Санкт-Петербурге и т.д.), что радикально меняет характер их взаимодействия с городом. Задачи, схожие с решаемыми в процессе первоначального размещения вокзалов в городской среде, поставит перед архитекторами развитие высокоскоростного железнодорожного движения, влекущее за собой реконструкцию старых и строительство новых вокзалов, а также реализация принятой концепции развития железнодорожной структуры Санкт-Петербурга с ее интеграцией в систему городского пассажирского транспорта [1].

Необходимость решения проблемы взаимодействия новой архитектуры с исторической тканью города при реконструкции существующих вокзалов и размещении их современной инфраструктуры определяет особую актуальность изучения истории формирования «градостроительной системы «вокзал – город» [2] с целью выявления общих закономерностей ее развития.

Материалы и методы. Исследование проведено на материалах архивных и библиографических источников, освещающих историю строительства первых вокзалов Санкт-Петербурга и Европы. Рассмотрен обширный картографический материал по Санкт-Петербургу, Москве и

некоторым столичным европейским городам со второй трети XIX по нач. XX вв. В рамках исследования зарубежного опыта размещения вокзалов в структуре города привлекался материал по истории строительства железнодорожных вокзалов в Париже и Лондоне в этот период, поскольку именно в них появились первые вокзалы.

Применен метод сравнительного анализа с привлечением источников по размещению первых железнодорожных вокзалов в городах с различной градостроительной планировочной структурой: радиально-кольцевой и линейной. Данный метод позволил выявить основные тенденции и принципы размещения первых железнодорожных вокзалов в середине XIX века и определить особенности размещения Санкт-Петербургских вокзалов. В основу метода положено рассмотрение вокзала как составляющей градостроительной системы «вокзал-город». При этом выявляются и анализируются как общие факторы, определяющие содержание и направленность векторов взаимодействия элементов этой системы, так и особенности, обусловленные градостроительным контекстом каждого из вокзалов Санкт-Петербурга.

Общие тенденции размещения первых вокзалов железных дорог. Общие принципы и тенденции размещения первых вокзалов железных дорог в середине XIX века определяются различными направлениями взаимодействия элементов системы «вокзал-город». С момента вхождения в города общедоступных железных дорог, их вокзалы, в какой-то мере, заняли место традиционных градостроительных доминант – дворцов и храмов.

Роль вокзалов не только как транспортных, но и общественных пространств, обусловила появление на начальном этапе *тенденции размещения их в центре города*, вызванной не только соображениями престижа, но и удобством пассажиров. Расположение вокзалов в центре города позволяло железным дорогам взять на себя часть функций внутригородского транспорта. Например, для первого вокзала Москвы Санкт-Петербургско-Московской железной дороги рассматривались варианты размещения в пределах Садового кольца, в частности, на Трубной площади [2]. Первую французскую железную дорогу Париж – Сен-Жермен (1837 г.) и линию Париж – Версаль предполагалось протянуть на «прекрасных чугунных виадуках», проходящих сквозь жилые дома, в центр Парижа (прямо за церковью Мадлен) [3, р. 54].

В большинстве случаев, тенденция размещения вокзалов в центре города на начальном этапе

осталась нереализованной как в Западной Европе, так и в России [2]. Причиной этому послужили сложности с отчуждением участков в густонаселенных центральных кварталах, а также распространяемые новым видом транспорта шум и искры, могущие повлечь пожар. Эта тенденция в полной мере была реализована лишь в Лондоне, где практически в геометрическом центре города располагается вокзал Чаринг-Кросс, а расстояние между наиболее удаленными друг от друга вокзалами Кеннон-Стрит и Ливерпуль-Стрит составляет всего 800 м [4; 5, с.15]. Подобное близкое расположение вокзалов в центре города обусловило отсутствие выраженной кольцевой связи между вокзалами, как это было в Париже или Москве.

Впоследствии, уже начиная с 1860-х годов, тенденция размещения вокзалов в центре города начинает реализовываться во многих городах мира: в Милане (1864), Риме (1867), Эдинбурге (1868), Стокгольме (1867-1871), Кельне, Мюнхене, Осло, Лиссабоне, Буэнос-Айресе, Нью-Йорке (1871), Будапеште (1877), Турине (1888), Варшаве, Амстердаме (1889), Токио (1909). Центральную роль вокзалу в своих градостроительных планах отводил и Ле Корбюзье, сравнивая его с «втулкой колеса» [6, с.36].

Другая тенденция также носила центростремительный характер и состояла в стремлении *объединить вокзалы* первых железных дорог различных направлений, что было связано не только с экономией средств при строительстве вокзалов, но и облегчало поиски места для их размещения, позволяя минимизировать затраты на отчуждение земли для нужд железной дороги. Эта тенденция носила «внешний» характер, исходя от городских органов управления и других заинтересованных в этом ведомств. В частности, Военное ведомство считало, что уменьшение числа вокзалов в Париже «более благоприятно для мобилизации войск» [3, р.117]. В случае реализации этих идей при строительстве первых железных дорог, мы не увидели бы многих вокзалов Парижа, а в Москве не появилась бы «площадь трех вокзалов» (Каланчевская, ныне Комсомольская площадь).

Эта тенденция, также, как и стремление железных дорог в центр города, не получила реализации на начальном этапе, встретившись с сопротивлением частных владельцев дорог, желающих иметь собственные вокзалы, в том числе, из имиджевых соображений. Идея централизации вокзалов возродилась в самом начале XX века с централизацией железных дорог в руках государства, которая, вкупе с изменившимися требованиями градостроительного контекста и их эксплуатации, инициировала проекты перестройки

и объединения вокзалов [7]. Реализации этой тенденции на данном этапе помешала сложная геополитическая ситуация: Первая мировая война и революция.

На практике размещение первых вокзалов железных дорог определялось, в большей мере, сложившейся градостроительной ситуацией: планировочной сеткой улиц, наличием свободной территории и пр. Плотность и статус застройки, как правило, уменьшались с удалением от центра, что определяло их меньшую, по сравнению с центром, стоимость, обусловив размещение большинства первых вокзалов у границ города. При этом необходимость максимально быстрой транспортной внутригородской связи, определила расположение вокзалов на основных градостроительных магистралях, ведущих к центру города.

Указанные факторы городского контекста определили наиболее распространенную схему расположения вокзалов: у исторических границ города вблизи основных магистралей, закрепляя и развивая исторически сложившуюся планировочную структуру города. Так, широко распространенная в средневековых городах радиально-кольцевая планировочная система обуславливала появление «колец вокзалов» в районе бывших крепостных стен в Париже и Москве [2]. При этом, линии железных дорог продолжали за границы города радиальные магистрали, связывающие вокзалы с его центром, способствуя расширению города по исторической планировочной схеме.

Подобное расположение вокзалов оказалось наиболее подходящим не только в градостроительном, но и в семантическом плане, как новых входов в город, маркирующих и, по сути, заменяющих собой как территориально, так и функционально, бывшие городские ворота.

Основная часть. Размещение первых вокзалов Санкт-Петербурга. Санкт-Петербург – тогдашняя столица Империи – стал отправной точкой строительства российских железных дорог. Там начал складываться первый железнодорожный узел и появились первые железнодорожные вокзалы в России: Царскосельский (Витебский) (1837), вокзал Санкт-Петербургско-Московской железной дороги (Николаевский, ныне Московский) (1851), Варшавский вокзал (1851), Петергофский вокзал (Балтийский) (1853–1857).

В Москве, ставшей впоследствии основным центром российской сети железных дорог, схема размещения вокзалов начала складываться позднее – начиная с 1860-х годов, с появления на Каланчевском поле рядом с первым московским вокзалом Санкт-Петербургско-Московской же-

лезной дороги Ярославского (1859-1861) и Рязанского (1863, ныне Казанского) вокзалов, сформировавших знаменитую «площадь трех вокзалов» (ныне Комсомольская площадь) [8].

Планировочная структура Петербурга, первоначальную основу которой составляло трехлучие его основных магистралей: Невского проспекта, Гороховой улицы и Вознесенского проспекта, сходящихся к Адмиралтейству, определила иную, чем в Москве или Париже, схему размещения вокзалов. Вокзалы расположились не по окружности вокруг центра у его исторических границ, а линейно вдоль южной границы города в конце этих магистралей: Царскосельский – вблизи завершения Гороховой улицы у Загородного проспекта (среднего луча), Николаевский – в конце прямого луча Невского проспекта, Варшавский и расположенный неподалеку Балтийский – в конце Измайловского проспекта за Обводным каналом [2] (рис. 1). Продолжая железные дороги эти магистрали как бы сводили их в одну точку в центре города у Адмиралтейства, транслируясь, в то же время, за его границы, определяя направления развития не только города, но и региона.

Впоследствии к сформировавшемуся на начальном этапе железнодорожному узлу добавились железные дороги северного направления, где появились новые вокзалы: вокзал Финляндской железной дороги (1870) и, уже в недавнее время, Ладожский вокзал (2001-2003). Северное расположение этих вокзалов трансформировало первоначальную линейную схему расположения вокзалов Санкт-Петербурга, дугообразно «загнув» ее к северу.

Все вокзалы Санкт-Петербурга, будучи конечными, останавливали движение железной дороги у тогдашних границ города. Таким образом сохранялась цельность градостроительной ткани центральной части города, а «разрезанной» железнодорожными путями оказалась его окраинная часть.

Для ввода железных дорог в город и размещения станций, включающих в себя, помимо вокзала, большое количество объектов, необходимых для их функционирования, требовались обширные пространства, поэтому на выбор конкретного места большое влияние оказывало наличие свободных территорий, либо возможность отчуждения земельных участков. В Санкт-Петербурге с этой целью использовались плацы военных гарнизонов, принципы размещения которых во многом совпадали с основными требованиями размещения вокзалов железных дорог – они также размещались у границ города на пересечении с основными магистралями, заменяя собой заставы у крепостных стен средневековых

городов [9]. Царскосельский вокзал занял часть Семеновского плаца, Николаевский – часть Александровского (рис. 2).



Рис. 1. Карта Санкт-Петербурга. 1871 г. А – Николаевский (ныне Московский) вокзал; Б – Царскосельский (ныне Витебский вокзал); В – Варшавский вокзал (закрыт); Г – Петергофский (ныне Балтийский) вокзал [21]

Для размещения первого вокзала страны и Санкт-Петербурга – *Царскосельского*, с которого в 1836 году началось движение до Царского Села, строителем этой дороги Герстнером первоначально было выбрано место на Царскосельском (ныне Московском) проспекте, являющемся практически прямой дорогой к Царскому селу, в 370 м от Обуховского моста через реку Фонтанку. Однако сложности с отчуждением земельных участков и стремление удешевить проект определили необходимость поисков поблизости свободной от застройки территории, в качестве которой был выбран Семеновский плац у Загородного проспекта между Гороховой улицей и Введенским каналом. В качестве временного вокзала «на дворе полковой церкви лейб-гвардии Семеновского полка» было построено «весьма неприглядное здание, вся окрестность которого «представляла унылый вид» [10, с. 9].

В 1849-1852 гг. на соседнем участке, приобретенном в 1843 году Обществом Царскосельской железной дороги на набережной Введенского канала (ныне Введенская улица), по проекту архитектора К.А. Тона был построен двухэтажный каменный вокзал, продолжающий линию застройки казарм Семеновского полка вдоль Загородного проспекта. Подобный тип размещения «растворял» здание вокзала в окружающей застройке со стороны города. Привокзальная площадь, необходимая для подъезда к вокзалу или отъезда от него, располагалась, в связи с этим, не напротив лицевого фасада, а вдоль его бокового корпуса со стороны Семеновского плаца, где была устроена открытая аркада (рис. 3). Главным путем сообщения с центром города служила Гороховая улица.



Рис. 2. План г. Петербурга. 1843 г.: А – Александровский плац – будущее место станции Санкт-Петербургско-Московской железной дороги; Б – Семеновский плац – место Царскосельской железной дороги [22]



Рис. 3. Пассажирский дом (вокзал) Царскосельской железной дороги в Санкт-Петербурге. Арх. К.А. Тон, Акварель, сер. XIX в. [сайт НТБ ПГУПС: library.pgups.ru]

В 1874–1876 гг. вокзал был расширен и перестроен в связи с увеличением пассажиропотока с сохранением общей градостроительной схемы. И лишь в начале XX века, после включения Царскосельской железной дороги в магистральную Московско-Виндаво-Рыбинскую железную дорогу, было возведено монументальное

здание, считавшееся современниками «бесспорно, самым интересным среди вокзалов нашей столицы» [10, с. 40], градостроительное решение площади перед которым ставилось в пример другим вокзалам.

Для размещения вокзала первой в России Санкт-Петербургско-Московской железной дороги (Николаевского, ныне Московского) было выбрано место на Знаменской площади, которая занимала важное градостроительное местоположение, будучи практически развязкой на пересечении трех основных направлений: Невского проспекта, дороги к Александро-Невской лавре и далее к Шлиссельбургу и старого Новгородского тракта [11]. Площадь получила свое название по находящейся там церкви Знамения (Входа Господня в Иерусалим), расположенной на берегу Лиговского канала (ныне Лиговский проспект) у Невского проспекта. Описание этой окраинной в то время площади дает известный в то время юрист А.Ф. Кони: «...Знаменская площадь обширна и пустынна... Двух и одноэтажные дома обрамляют ее, мимо протекает узенькая речка. Вода в ней мутна и грязна, а по берегу тянутся грубые деревянные перила. Это Лиговка» [Цит. по: 12, с. 66].

Согласно документации по отчуждению земельных участков для размещения станции железной дороги «под станцию, плац и улицу отошли земли городския, Александровской Лавры и частных лиц, а из прежнего Александровского плаца часть его под станцию» [13].

Появление железной дороги превратило «захолустную» площадь в значительный градостроительный ансамбль, устройству которого уделялось внимание на самом высшем уровне. Император Николай I добавил к площади дополнительные места, «как отчеркнуто Его Величества карандашом» [14]. Площади была придана форма трапеции, практически по центральной оси которой проходил Невский проспект, а основанием служил бывший Лиговский канал, заключенный в трубу, над которым прокладывалась новая улица (нынешний Лиговский проспект). По другую сторону площади улицы расходились веером, напоминая классическое «петербургское трехлучие», основу которого составляло продолжение Невского проспекта, меняющего в этом месте свое направление в сторону Александро-Невской Лавры. Здание вокзала, построенное по проекту К.А. Тона в 1843–1851 гг., формировало южную боковую грань трапеции, занимая всю ее длину. Другую боковую грань трапеции формировало здание «воксала» - гостиницы с увеселительными заведениями (арх. А.П. Гемилиан, ныне гостиница «Октябрьская») [11]. (рис. 4).

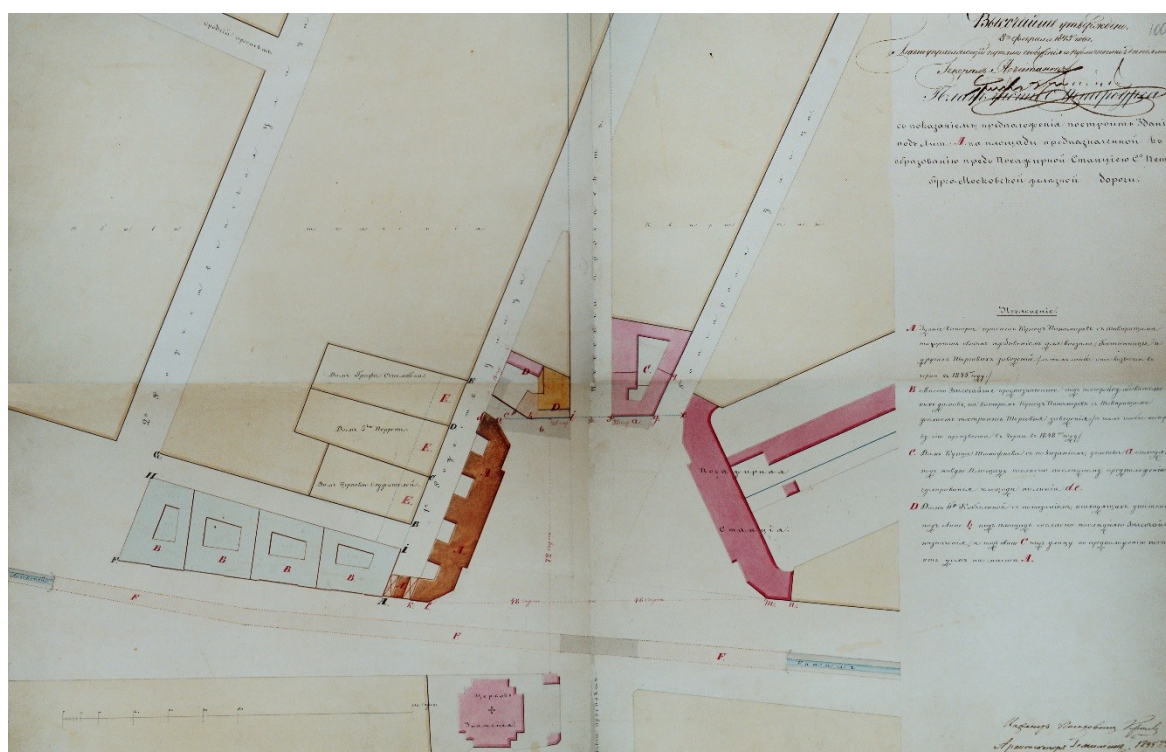


Рис. 4. Санкт-Петербург. Знаменская площадь. Генплан, арх. Гемилиан, 1845 г. [15]

Придание площади формы трапеции, суживающейся в продолжение Невского проспекта, создавало дополнительный эффект сокращения перспективы, зрительно увеличивая площадь и «монументализируя» ее. Данный прием приме-

нялся в планировке наиболее значительных площадей периода Ренессанса, увлеченного проблемами перспективы (площадь Капитолия, площадь перед собором св. Петра Риме в Риме и др.). Ренессансные традиции в формировании Знаменской привокзальной площади отразились не

только в ее конфигурации, но и в архитектуре обрамляющих ее зданий с аркадами вдоль фасадов, как на площадях Италии.

По плану урегулирования площади было «предназначено обстроить ее соответственными пассажирской станции четырехэтажными зданиями, по Высочайше утвержденным фасадам» [15]. Проект площади, включающий и фасады обрамляющих ее зданий, был разработан архитектором Н.Е. Ефимовым. В проектировании фасадов частных домов, выходящих на площадь, принимал участие также архитектор К. А. Тон.

Знаменская площадь (ныне Площадь Восстания) в Петербурге является уникальным примером создания нового градостроительного ансамбля, инициированного размещением вокзала, ставшего новой градостроительной доминантой. Привокзальное значение площади стало, безусловно, приоритетным по отношению к церкви, давшей ей свое название.

Варшавский вокзал в Петербурге был построен в 1852–1853 гг. по проекту архитектора Скаржинского на незаселенной территории за Обводным каналом, через который был перекинут мост, продолжающий Измайловский проспект. (рис. 5).

При этом, если два первых вокзала располагались сбоку от основных магистралей, составляющих планировочное трехлучие Петербурга, давая возможность их дальнейшего продолжения, то Варшавский вокзал замыкал собой третий луч – Измайловский проспект. Это отвечало классическим принципам градостроительства с ориентацией дорог на основные градостроительные доминанты, которой в данном случае выступило здание вокзала. Однако подобное размещение впоследствии стало рассматриваться как градостроительная ошибка, поскольку останавливало дальнейшее развитие этой планировочной оси, препятствуя слиянию Измайловского и Ново-Измайловского проспектов.

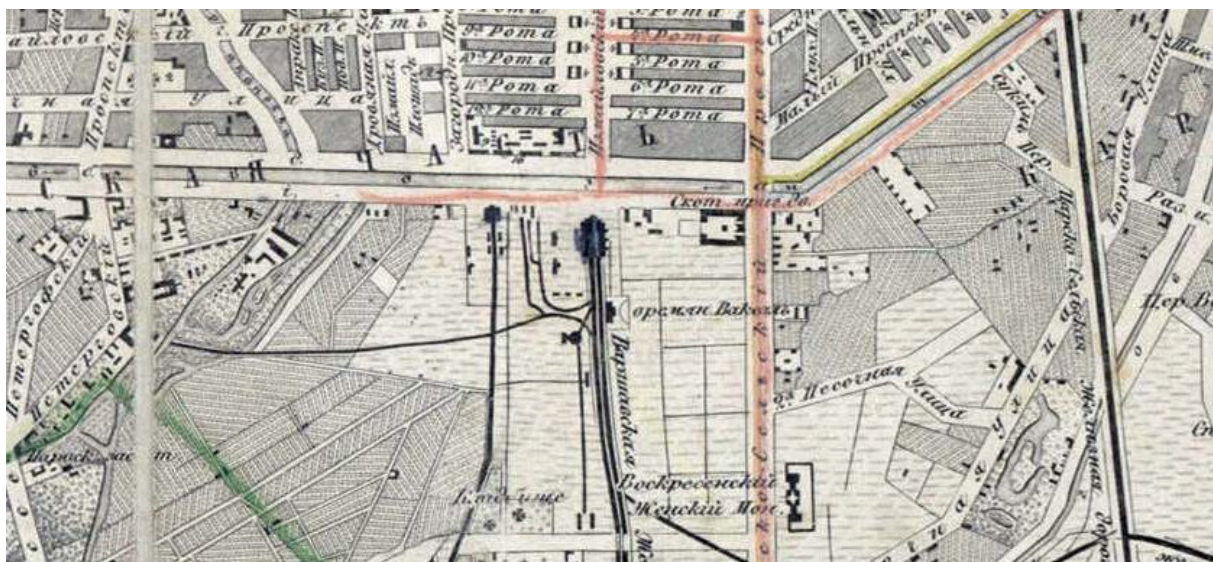


Рис. 5. Размещение Варшавского вокзала. Фрагмент карты Санкт-Петербурга. 1859 г. [22]

Здание вокзала было выдвинуто непосредственно на красную линию набережной Обводного канала, в связи с чем функцию привокзальной площади взяли на себя дворы отправления и прибытия, расположенные вдоль боковых сторон здания, где располагались и входы в вокзал. Эта схема сохранилась и в новом здании вокзала, построенном вместо первоначального в 1858–60 гг. по проекту архитектора П. О. Сальмановича, после передачи дороги Главному Обществу российских железных дорог.

В настоящее время Варшавский вокзал сменил свое функциональное назначение на торгово-развлекательный центр. Смена функции привела к радикальному изменению градостроительного контекста – территория, ранее занятая железнодорожными путями и постройками, в

настоящее время застраивается жилыми комплексами. Дворы отправления и прибытия бывшего вокзала используются в качестве автомобильных парковок. Градостроительная ткань города, ранее «разрезанная» железной дорогой, смыкается, восстанавливая свою целостность.

Петергофский (Балтийский) вокзал железной дороги до Петергофа был построен в 1853–1857 гг. в непосредственной близости от Варшавского на средства барона А.Л. Штиглица по проекту архитектора А.И. Кракау, взявшего за аналог Восточный вокзал в Париже. Вокзал, как и оба предыдущие, располагался в непосредственной близости от территории, занятой военным гарнизоном – казармами Измайловского полка с Измайловской площадью.

Здание Петергофского вокзала разместили на незастроенном участке напротив моста, продолжающего Лермонтовский проспект. Железнодорожные пути, подходящие к зданию Петергофского вокзала, проходили по огородам Тентелевой деревни. Вокзал, в отличие от Варшавского, разместили на удалении от Обводного канала, что позволило устроить перед лицезым фасадом вокзала обширную градостроительно и функционально организованную привокзальную площадь (рис.6).

Старая Митрофаниевская дорога, ведущая к церкви св. Митрофания на одноименном православном кладбище, на трассе которой было помещено здание вокзала, была перенесена в сторону Варшавского вокзала, разделив территории двух станций. Впоследствии эта небольшая дорога превратилась в Митрофаньевское шоссе – транспортную магистраль, взявшую на себя функцию Измайловского проспекта, замкнутого зданием Варшавского вокзала.

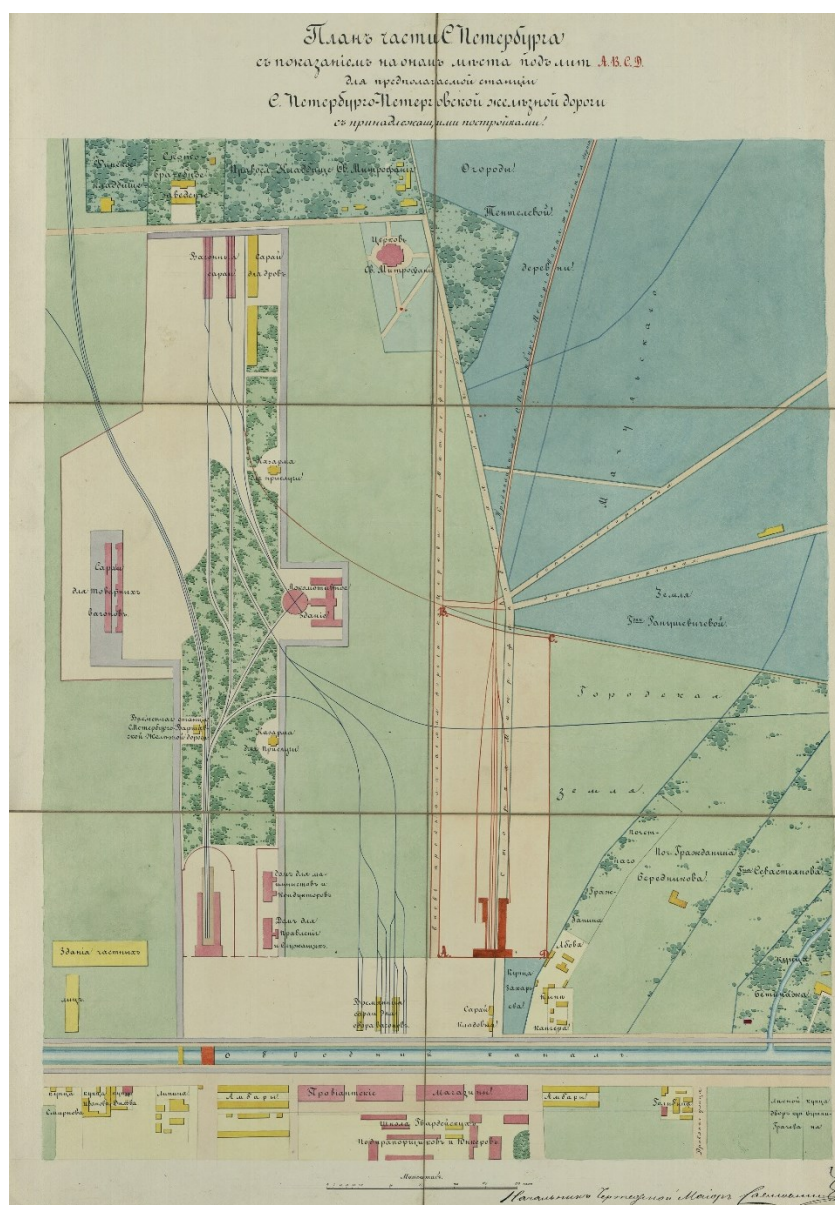


Рис. 6. «План части Санкт-Петербурга с показанием на ономъ мѣста под лит. А, В, С, Д для предполагаемой станции Петербурго-Петергофской желѣзной дороги с принадлежащими постройками» [16].

На появление урбанистического «машинного» масштаба в здании Петергофского и расположенного рядом Варшавского вокзалов, по всей видимости, оказало влияние не только развитие типологии вокзалов, но и их расположение за городской окраиной, что позволило не учитывать

традиционный масштабный строй градостроительного контекста – в отличие от зданий Николаевского и Царскосельского вокзалов, расположенных в городской застройке.

В 1907 году произошло слияние Балтийской (бывшей Петергофской) и Петербурго-Варшавской железных дорог, в результате которого была организована Северо-западная железная дорога, для которой предполагалось устройство объединенного вокзала [7]. Ф.Е. Енакиев считал, что два соседних вокзала – Варшавской и Балтийской дороги, занимают «самое неудобное положение как проезда, так и отдаленности» [17]. Санкт-Петербургский Центральный железнодорожный вокзал, который предполагалось разместить в центре города, стал одной из ключевых идей концепции градостроительного преобразования Петербурга Л.Н. Бенуа и Ф.Е. Енакиева [18] (рис. 7).

Для вокзала предлагалось место у Троицкого собора на месте, занятом казармами 2-й гвардейской артиллерийской бригады Измайловского полка. Этому вокзалу предназначалась роль важнейшего градостроительного узла, к которому прокладывался новый парадный проспект Императора Николая II. Таким образом, в здании этого вокзала предполагалось реализовать обе основные первоначальные тенденции в размещении вокзалов: их объединение и размещение в центре города. Реализации проекта помешали война и революция.



Рис. 7. Новый проспект Императора Николая II и вокзала Северо-западных железных дорог. Перспективный вид от Мариинского театра. Инж. Путей сообщения Ф. Енакиев, арх. Л. Бенуа. 1910 г. [17]

В 60-х годах XIX в. с развитием промышленности, ростом городов и железнодорожного движения наступает «железнодорожный бум», который характеризовался не только строительством новых железных дорог и их вокзалов, но и перестройкой старых, расширение которых с увеличением количества привокзальных путей вызвало потребность в отчуждении новых городских территорий.

К началу XX века необходимость реконструкции вокзалов и их привокзальных площадей, помимо функциональных требований железных дорог, диктовалась также изменившейся гра-

достроительной и социально-экономической ситуацией, включая появление автомобильного транспорта и интенсификацию дорожного движения, с которым уже не справлялись старые привокзальные площади [19].

В настоящее время взаимодействие вокзала и города наполняется новыми факторами влияния как со стороны вокзала, связанными с их качественной реконструкцией и с функциональной переориентацией некоторых из них, влекущим за собой радикальное изменение градостроительной ситуации в зоне их влияния, так и со стороны города, определяющего параметры реконструк-

тивной деятельности. Возможные параметры реконструктивных мероприятий диктуются также требованиями государственной охраны объектов культурного наследия, к числу которых принадлежат все первые вокзалы Санкт-Петербурга.

Выводы.

1. Железная дорога и ее вокзалы, фактически с момента их появления, являются пространственным фактором, активно влияющим на развитие города, формируя градостроительную систему «вокзал – город», основывающуюся на взаимодействии и взаимовлиянии составляющих ее элементов. Различные направления векторов взаимодействия: «от вокзала к городу» и «от города к вокзалу», менялись на различных исторических этапах в зависимости от их значения и содержания [2]. Известный исследователь архитектуры Е. И. Кириченко отмечает также «упреждающий» фактор влияния железной дороги на промышленно-экономический подъем, «начинающийся уже при известии о том, что дорога придет в те или иные места» [20, с.31].

2. Первоначальный вектор взаимодействия был направлен от города к вокзалу, поскольку именно градостроительный контекст диктовал, как правило, место размещения вокзала. Расположение вокзалов в большой мере определялось сложившейся градостроительной планировочной структурой города, определяя вектор влияния «от города-к вокзалу». В исторических городах с наиболее распространенной радиально-кольцевой планировочной структурой, как правило, формировалось «кольцо вокзалов» у старой границы города на месте бывших крепостных стен. В Санкт-Петербурге, строившемся в более позднее время по линейной планировочной схеме, базовую основу которой составляло трехлучие основных магистралей, тем не менее, присутствовал тот же принцип расположения вокзалов, поддерживающий исторически сложившуюся планировочную структуру – в конце основных магистралей у границ города.

3. Вектор взаимодействия между вокзалом и городом меняет свое направление сразу же после появления железных дорог и их вокзалов, которые начинают оказывать активное влияние на градостроительную структуру, определяя направления и точки роста. Повышение «ценности» окраинной ранее территории размещения вокзалов приводит к изменению статуса ее застройки с заменой на более крупные и значимые в градостроительном плане объекты. Вдоль рельсовых путей активно формируются новые узлы фабричной и жилой застройки на окраинах, которые связываются с вокзалами новой сеткой улиц.

4. Будучи конечными, вокзалы останавливали движение железных дорог у бывших границ

города. Это определило основной ареал их градостроительного влияния – диффузно в районе расположения вокзалов и вдоль железных дорог за тогдашними границами города. Центральная часть города сохраняла при этом свою градостроительную целостность.

5. Расположение первых вокзалов оказало влияние на их архитектурно-художественный облик: Николаевский (ныне Московский) и Царскосельский (ныне Витебский) вокзалы, приближенные к центру города, соответствовали масштабному и стилизовому строю градостроительного контекста; Варшавский и Балтийский вокзалы, расположенные на значительном удалении от центра за Обводным каналом, с ненормируемыми свободными территориями, получили облик, более типологически и масштабно соответствующий новой «машинной» функции здания.

6. В настоящее время с развитием высокоскоростного железнодорожного движения встает вопрос о размещении их вокзалов и объектов инфраструктуры. С учетом исторического опыта интеграции вокзалов в градостроительный контекст города, с целью минимизации нарушения целостности градостроительной ткани города, представляется целесообразным устройство объединенных вокзалов с размещением инфраструктуры высокоскоростных железных дорог максимально близко к существующим историческим вокзалам, с объединением с внутригородской транспортной системой (метро). Другим вариантом, с учетом исторического опыта, может быть размещение вокзалов высокоскоростных железных дорог у современных границ города на основных транспортных магистралях, ведущих к центру, с организацией съездов с КАД (кольцевой автодороги) и ЗСД (западного скоростного диаметра).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Семенцов С.В., Славина Т.А., Антонов В., Векслер А. Комплекс сооружений ВСМ и проблемы городской среды современного Петербурга. Опыт градостроительной экспертизы. // Инженер путей сообщения: приложение к газете «Наш путь». №3(4). 1996. С. 84–93.
2. Петухова Н.М. Градостроительная роль железнодорожных вокзалов России и эволюция их архитектуры. 1830-1910-е годы: диссертация на соискание ученой степени кандидата искусствоведения. Санкт-Петербург, 2010.
3. Les Grandes Gares Parisiennes du XIX siecle”. Sous la direction de Karen Bowie, 1987. 204 p.
4. Simmons Jack. St. Pancras station. London: George Allen and Unwin Ltd, 1968. 120 p.

5. Батырев В.М. Вокзалы. Москва: Стройиздат, 1988. 216 с.
6. Корбюзье ле. Архитектура XX века. Москва: Прогресс, 1977. 303 с.
7. Северо-западная железная дорога. Эскизный проект и смета объединения пассажирских и товарных станций С.-Пб – Варшавской и Балтийской линий в одну общую головную станцию с общим вокзалом (с пропускной способностью в 18 – 24 пар пассажирских поездов в час) // РГИА. Ф.350. Оп.44. Ед. хр. 348. 1910.
8. Петухова Н.М. Площадь трех вокзалов. Архитектурная биография. Санкт-Петербург: изд-во «Остров», 2005. 156 с.
9. Семенцов С.В., Шаблаева Н.К. Размещение объектов российской армии и градостроительное развитие Санкт-Петербурга в XVIII-XIX веках // Петербургские чтения – 98. Санкт-Петербург и вооруженные силы. Санкт-Петербург, 1998. С. 102–107.
10. Золотницкий И.П. Путеводитель по Царскосельской дороге: репринтное издание 1882 г. Санкт-Петербург: ЛИК, 2007. 238 с.
11. Формирование градостроительного ансамбля привокзальной Знаменской площади в Санкт-Петербурге. // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 5. С. 42–54.
12. Мурашова Н.В. Федор Демерцов. Санкт-Петербург: «Белое и Черное», 2002. 186 с.
13. Материалы по отчуждению земельных участков под постройку вокзала, 1844-1847 // РГИА. Ф. 350. Оп. 31. Ед. хр. 290. Л. 24.
14. Копия со Всеподданнейшего доклада Г. Главногоуправляющего Путиями Сообщения и Публичных Зданий от 24 ноября 1843 г. за № 861 // РГИА. Ф.218. Оп.3. Ед. хр.570. Л.133.
15. Всеподданнейший доклад Г. Главногоуправляющего Путиями Сообщений и Публичных Зданий от 13 марта 1847г. за №273 // РГИА. Ф. 218. Оп.3. Ед. хр.570.
16. План части Санкт-Петербурга с показанием на оном места под лит. А, В, С, Д для предполагаемой станции Петербурго-Петерговской железной дороги с принадлежащими постройками. // РГИА. Ф. 350. Оп. 43. Ед. хр. 217. Л. 1.
17. Енакиев Ф.Е. Задачи преобразования Петербурга. Санкт-Петербург. 1912. 81 с.
18. Петухова Н.М. Идея Санкт-Петербургского Центрального железнодорожного вокзала в градостроительных планах Л.Н. Бенуа // Леонтий Бенуа и его время : Материалы конференции 16 – 17 октября 2006 г./ Ред.-сост. В.А. Фролов. Санкт-Петербург.: ГНИИ «Институт истории искусств», 2008. С. 250–257.
19. Петухова Н.М. Архитектура вокзалов как феномен повседневной культуры (конкурсы начала XX века на проект перестройки Николаевского вокзала в Петербурге) // Феномен повседневности: гуманитарные исследования: материалы международной научной конференции «Пушкинские чтения – 2005». Санкт-Петербург: Астерион, 2005. С. 81-87.
20. Кириченко Е.И. Градостроительство России сер. XIX – нач. XX в. Москва: Прогресс-Традиция, 2001. 340 с.
21. Санкт-Петербург. Планы и карты [Карты] : альбом / сост. ЗАО «Карта» ЛТД ; гл. ред. М. Ропотова. Санкт-Петербург: ЗАО «Карта» ЛТД, 2004. 120 с.
22. Санкт-Петербург. 300 лет на планах и картах [Карты] : мультимедиа альбом / Российская национальная библиотека. Санкт-Петербург: изг. ООО «Спаеро», 2002.

Информация об авторах

Петухова Нина Михайловна, кандидат искусствоведения, доцент кафедры Архитектурного и градостроительного наследия. E-mail: mama8nina@yandex.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4.

Поступила 27.09.2021 г.

© Петухова Н.М. 2022

Petukhova N.M.

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

E-mail: mama8nina@yandex.ru

INTEGRATION OF THE FIRST RAILWAY STATIONS OF SAINT PETERSBURG INTO THE URBAN PLANNING CONTEXT OF THE CITY

Abstract. The first railway stations in St. Petersburg: Tsarskoselsky (1836), Nikolaevsky (1851, now Moskovsky) Varshavsky (1853), Peterhof (1853-1857, now Baltic) are the objects of research. They formed the first railway junction in Russia. The placement of these stations in the urban structure of the city is considered. The method of comparative analysis is applied with the involvement of sources for the placement of the first railway stations in cities with a different urban structure. This method allows to identify the main trends and

principles of the placement of the first railway stations in the middle of the 19th century and to determine the features of the placement of St. Petersburg stations. The method is based on the consideration of the station as a component of the urban-planning system "station- city". At the same time, both the general factors that determine the content and direction of the vectors of interaction of the elements of this system and the features caused by the urban planning context of each of the stations in St. Petersburg are identified and analyzed. In result, the basic principles of integration of the first railway stations into the urban planning structure of St. Petersburg are revealed. The vectors of interaction between the city and the station are shown: the influence of the existing planning scheme of the city on the placement of stations and the importance of stations in the subsequent change and development of the urban planning context.

Key words: *the first railway stations of St. Petersburg, the urban planning structure, the interaction of the station and the city, the main trends in the placement of the first railway stations, the first railway junction in Russia.*

REFERENCES

1. Sementsov S.V., Slavina T.A., Antonov V., Veksler A. The complex of high-speed railway structures and problems of the urban environment of modern St. Petersburg. Experience in urban planning expertise. [Kompleks sooruzhenij VSM i problemy gorodskoj sredy sovremennogo Peterburga. Opyt gradostroitel'noj ekspertizy]. Inzhener putej soobshcheniya: prilozhenie k gazete «Nash put'». 1996. No. 3 (4). Pp. 84–93. (rus).
2. Petukhova N.M. Urban planning role of railway stations in Russia and the evolution of their architecture. 1830-1910s: dissertation for the degree of candidate of art history. [Gradostroitel'naya rol' zheleznodorozhnyh vokzalov Rossii i evolyuciya ih arhitektury. 1830-1910-e gody]. St.Petersburg, 2010. (rus).
3. Bowie Karen. Les Grandes Gares Parisiennes du XIX siecle, 1987. 204 p.
4. Simmons Jack (ed.). St. Pancras station. London: George Allen and Unwin Ltd, 1968. 120 p.
5. Batyrev V.M. Railway stations. [Vokzaly]. Moscow: Stroyizdat, 1988. 216 p. (rus).
6. Le Corbusier. Architecture of the 20th century [Arhitektura XX veka]. Moscow.: Progress, 1977. 303 p. (rus).
7. Northwest Railway. Draft design and estimate for the unification of passenger and freight stations of St.-Petersburg - Varshavskaya and Baltic lines into one common head station with a common station (with a throughput capacity of 18 - 24 pairs of passenger trains per hour) [Severo-zapadnaya zheleznaya doroga. Eskiznyj proekt i smeta ob"edineniya passazhirskih i tovarnyh stancij S.-Pb – Varshavskoj i Baltijskoj linij v odnu obshchuyu golovnyuyu stanciyu s obshchim vokzalom (s propusknnoj sposobnost'yu v 18 – 24 par passazhirskih poezdov v chas)]. RGIA, coll.350, aids. 44, foll. 348.1910. (rus).
8. Petukhova N.M. The area of three stations. Architectural biography. [Ploshchad' trekh vokzalov. Arhitekturnaya biografiya]. St.Petersburg: "Ostrov", 2005. 155 p. (rus).
9. Sementsov S.V., Shablaeva N.K. Placement of objects of the Russian army and urban development of St. Petersburg in the 18th-19th centuries. [Razmeshchenie ob"ektov rossijskoj armii i gradostroitel'noe razvitie Sankt-Peterburga v HVIII-XIX vekah.]. Peterburgskie chteniya – 98. Sankt-Peterburg i vooruzhennye sily. Saint-Petersburg, 1998. Pp. 102–107. (rus).
10. Zolotnitsky I.P. Guide to the Tsarskoye Selo road [Putevoditel' po Carskosel'skoj doroge]: reprinted edition 1882. St. Petersburg: LIK, 2007. 238 p. (rus).
11. Formation of the urban planning ensemble of the railway station Znamenskaya square in St. Petersburg. [Formirovanie gradostroitel'nogo ansamblya privokzal'noj Znamenskoj ploshchadi v Sankt-Peterburge]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 5. Pp. 42–54. (rus).
12. Murashova N.V. Fed–or Demertsov. [Fedor Demercov]. St.Petersburg: «Beloe i Chernoe», 2002. 186 p. (rus).
13. Materials on the alienation of land for the construction of the station, 1844-1847. [Materialy po otchuzhdeniyu zemel'nyh uchastkov pod postrojku vokzala, 1844-1847]. RGIA, coll. 350, aids. 31, foll. 290. P. 24. (rus).
14. A copy of the All-Subject Report of G. General Manager of Ways of Communication and Public Buildings dated November 24, 1843, No. 861. [Kopiya so Vsepoddannejshego doklada G. Glavnoupravlyayushchego Putyami Soobshcheniya i Publichnyh Zdanij ot 24 noyabrya 1843 g. za № 861]. RGIA, coll.218, aids. 3, foll. 570. P. 133. (rus).
15. The most submissive report of G. General Manager of the Ways of Communications and Public Buildings dated March 13, 1847. for No. 273. [Vsepoddannejsnij doklad G. Glavnoupravlyayushchego Putyami Soobshchenij i Publichnyh Zdanij ot 13 marta 1847g. za №273]. RGIA, coll. 218, aids. 3, foll. 570. (rus).
16. Plan of a part of St. Petersburg with an indication of the place under lit. A, B, C, D for the proposed station of the Petersburg-Petergovskaya railway with the buildings belonging to it. [Plan chasti Sankt-Peterburga s pokazaniem na onom mesta pod lit. A, V, S, D dlya predpolagaemoj stancii Peterburgo-Petergovskoj zheleznoj dorogi s

prinadlezhashchimi postrojkami]. RGIA, coll. 350, aids. 43. foll. 217. P. 1. (rus).

17. Enakiev F.E. The tasks of transforming St. Petersburg. [Zadachi preobrazovaniya Peterburga]. St. Petersburg. 1912. 81 p. (rus).

18. Petukhova N.M. The idea of the St. Petersburg Central Railway Station in L.N. Benois [Ideya Sankt-Peterburgskogo Central'nogo zheleznodorozhnogo vokzala v gradostroitel'nyh planah L.N. Benua. Leontij Benua i ego vremya : Materialy konferencii 16 – 17 oktyabrya 2006 g./ Red.-sost. V.A. Frolov. – St. Petersburg: GNII «Institut istorii iskusstv», 2008. Pp. 250–257. (rus).

19. Petukhova N.M. The architecture of railway stations as a phenomenon of everyday culture (competitions at the beginning of the twentieth century for the project of rebuilding the Nikolaevsky railway station in St. Petersburg). [Arhitektura vokzalov kak fenomen povsednevnoj kul'tury (konkursy nachala HKH veka na proekt perestrojki Nikolaevskogo

vokzala v Peterburge)]. Fenomen povsednevnosti: gumanitarnye issledovaniya: materialy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Pushkinskie chteniya – 2005». St. Petersburg: Asterion, 2005. Pp. 81–87. (rus).

20. Kirichenko E.I. (total. ed.) Urban planning in Russia in the middle of the XIX - early XX century: General characteristics and theoretical problems. Vol. 1. [Gradostroitel'stvo Rossii serediny XIX – nach. XX v.: Obshchaya harakteristika i teoreticheskie problem]. Moscow: Progress-Tradition, 2001. 340 p. (rus).

21. St. Petersburg. Plans and maps [Maps] [Plany i karty]: album. comp. CJSC "Karta" LTD; ch. ed. M. Ropotova. St. Petersburg: ZAO "Karta" LTD, 2004. 120 p. (rus).

22. St. Petersburg. 300 years on plans and maps [Maps] [Sankt-Peterburg. 300 let na planah i kartah]: multimedia album. National Library of Russia. St. Petersburg: ex. LLC "Spaero", 2002.

Information about the authors

Petukhova, Nina M. PhD. E-mail: mama8nina@yandex.ru. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, St. Petersburg, st. 2 Krasnoarmeyskaya, 4.

Received 27.09.2021

Для цитирования:

Петухова Н.М. Интеграция первых железнодорожных вокзалов Санкт-Петербурга в градостроительный контекст города // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 1. С. 70–82. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-70-82

For citation:

Petukhova N.M. Integration of the first railway stations of Saint Petersburg into the urban planning context of the city. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 1. Pp. 70–82. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-70-82

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-83-89

Бондаренко Н.И., Басов В.О., Даценко А.О.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: bondarenko-71@mail.ru*

РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ ВЯЖУЩИХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТЕКЛООТХОДОВ

Аннотация. В работе исследовалась возможность использования стеклоотходов в качестве вяжущего вещества для стеклобетона. На сегодняшний день строительная промышленность предъявляет к вяжущим материалам новые требования, наряду с совершенствованием производства портландцемента ведутся исследования по изучению новых видов вяжущих. Утилизация стекольного боя обусловлена не только экологическими, но и экономическими предпосылками. В работе проводились исследования свойств стекол для получения вяжущих. С помощью рентгенофлуоресцентного метода исследован химический состав тарного и листового стекол, определены основные оксиды исходного сырья. Подобран активирующий компонент для композиционного вяжущего. На основании экспериментальных данных установлено, что наиболее целесообразно применение в качестве активатора жидкого стекла в количестве 5 % от массы композиционного вяжущего. Установлено, что стеклянный наполнитель необходимо использовать в сочетании с цементом для получения композиционного вяжущего, так как для стеклопорошков щелочные агенты Na_2CO_3 и Na_2SiO_3 не работают как активаторы. Определены оптимальные составы композиционного вяжущего и подробно исследованы прочностные свойства полученных образцов. Составы с активатором Na_2SiO_3 показали наибольшие показатели по прочности, чем составы с активатором Na_2CO_3 .

Ключевые слова: стеклобой, стеклобетон, цемент, композиционные вяжущие, щелочной активатор.

Введение. Вяжущие вещества – основа современного строительства, которые широко применяются для производства бетонов, штукатурных и кладочных растворов [1–4].

Цементобетон и железобетон на сегодняшний день являются самыми востребованными материалами в строительстве. Сейчас широко используется модифицированный бетон, который получают с применением комплексных добавок [5, 6], к таким бетонам относят полимербетон, стеклобетон и другие. Данные материалы обладают такими высокими характеристиками, как прочность, морозостойкость, коррозионная стойкость, трещиностойкость [7–9]. Применение композиционных материалов повышает эксплуатационные свойства конструкций.

Использование различных видов отходов как составляющей строительных материалов повлекло за собой увеличение внимания к проблеме утилизации несортированного стеклобоя [10–12]. Изготовление цемента считается энергоёмким производством, так как связано с большими расходами топлива и сырья. Разработка составов и материалов для строительной промышленности с применением стеклоотходов вызвано экологическими и экономическими положениями.

Проблемы рационального использования цемента в бетоне и изделиях на его основе являются весьма актуальными, в этой связи необходима разработка композиционных материалов с использованием смешанных вяжущих, а также

внедрение такой технологии, которая гарантировала бы высокие эксплуатационные характеристики композитов [13].

Материалы и методы. Для проведения экспериментальных исследований были использованы следующие сырьевые материалы: портландцемент марки ЦЕМ I 42,5Н производства ЗАО «Белгородский цемент» (ГОСТ 10178–85); песок Корочанского месторождения (ГОСТ 8736–2014); вода (ГОСТ 23732–2011), стеклобой листового и тарного стекол. Исследование химического состава стекол проводили на спектрометре APL 9900 «Thermo scientific» рентгенофлуоресцентным методом. Для эксперимента использовался стеклопорошок с $S_{уд} = 500 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Для обеспечения в водном растворе высокощелочной среды ($\text{pH} \geq 13$) были выбраны два вида активирующих агентов: жидкое стекло Na_2SiO_3 и карбонат натрия Na_2CO_3 . Щелочной активатор использовался в виде водного раствора. Испытания образцов на прочностные характеристики проводили на гидравлическом прессе П-10.

Основная часть. SiO_2 , Na_2O и Al_2O_3 являются основными оксидами исходного сырья, от содержания которых зависит механизм структурообразования в щелочеалюмосиликатных вяжущих, а также от их соотношений в щелочеактивированной системе [14]. Натрий-кальций-силикатное стекло может рассматриваться как аморфный алюмосиликатный материал, содержащий в

своем составе щелочные и щелочноземельные компоненты. Растворимость кристаллического кремнезёма, как и аморфного, в нейтральной и кислой среде была минимальна, тогда как в щелочной среде резко возрастала. Это объясняется

формированием в системе легкорастворимых щелочных силикатов.

Для исследований применялся стеклобой зелёной тары и бой листового стекла, химический состав стёкол представлен в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав стекол

	Содержание оксидов, мас. %								
	SiO ₂	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	SO ₃	Fe ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃
Листовое стекло	71,3	15,0	1,5	4,2	7,5	0,3	0,1	0,1	–
Тарное стекло	68,8	14,2	3,3	3,5	9,2	0,6	–	0,3	0,1

На основании обзора литературных данных для исследований выбраны два вида активирующего агента: жидкое стекло и сода [4, 15–20]. С целью определения наиболее эффективного активирующего агента заформованы составы вяжущего на основе стекла с разными активаторами. Для эксперимента использовался стеклопорошок с $S_{уд} = 500 \text{ м}^2/\text{кг}$ в количестве 100 % и щелочной активатор в виде водного 5-% раствора. После формования образцы подвергались сушке при температуре 50 °С в течение 9 часов, далее набор прочности происходил при нормальных условиях твердения.

В ходе эксперимента исследована зависимость характера образования структуры алюмосиликатной вяжущей системы от химической природы активирующего компонента. При взаимодействии силикатного стекла со щелочами идёт образование анионов SiO_3^{2-} , SiO_4^{4-} , $\text{Si}_2\text{O}_5^{2-}$, а также силикатов щелочных металлов [21]. По-

вышение растворимости кремнезёма при взаимодействии со щелочами идёт с образованием легкорастворимых щелочных силикатов, дополнительно переводящих SiO_2 в раствор, в результате чего образуется жидкое стекло.

Растворы едких щелочей стабилизируют систему, так как щелочи химически связывают коллоидный кремнезем. Растворы щелочных силикатов содержат в своем составе значительное количество кремниевой кислоты, которая склонна к полимеризации.

Измельченный стеклобой при взаимодействии с водой не проявляет вяжущих свойств независимо от наличия в его составе большого количества щелочи [22]. Для изучения кинетики изменения во времени прочностных характеристик вяжущих систем на основе тарного и листового стёкол с различным типом щелочных активаторов были определены показатели прочности для затвердевших систем в разном возрасте твердения (рис. 1).

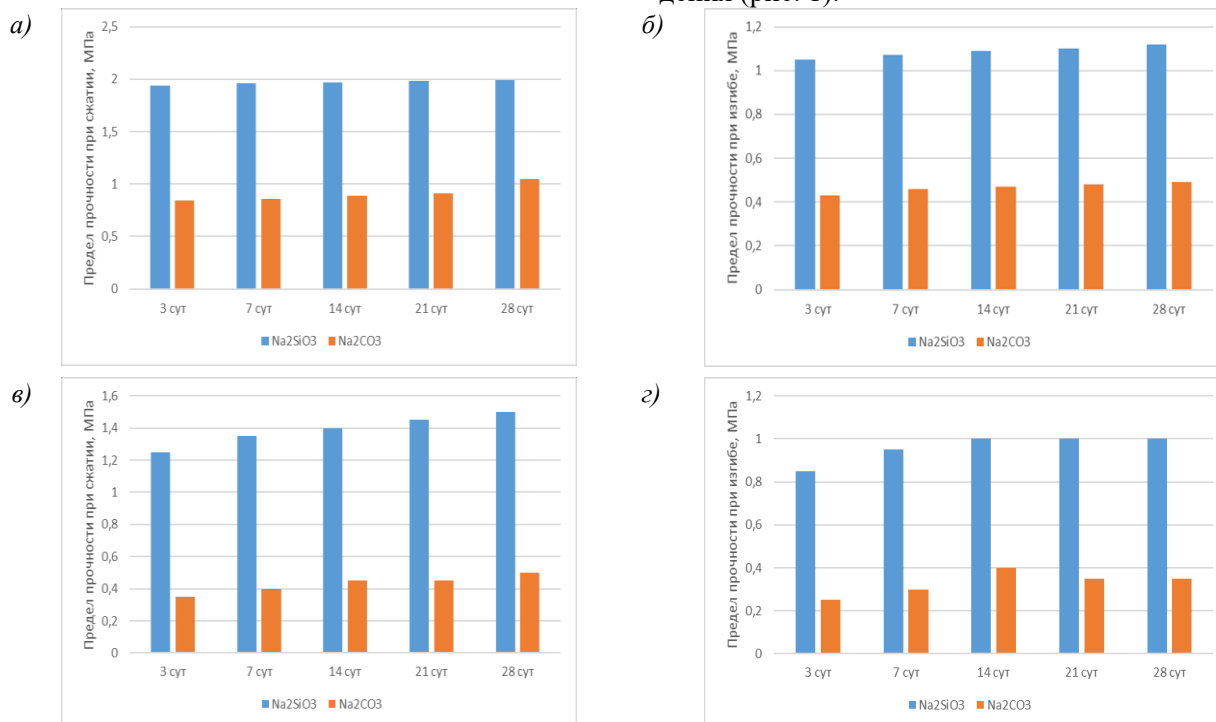


Рис. 1. Кинетика набора прочности образцов с активаторами на основе:
а, б – стеклопорошка тарного стекла; в, з – стеклопорошка листового стекла

В ходе проведённых исследований было установлено, что экспериментальные составы, активированные Na_2CO_3 и Na_2SiO_3 показали низкую прочность на всех этапах твердения. Кроме этого, составы, активированные Na_2CO_3 имели на

поверхности серьезные высолы (рис. 2, а), что говорит о том, что часть вводимого в состав активатора не прореагировала со стеклопорошком. Отсюда следует, что данный компонент обладает низкой активирующей способностью.

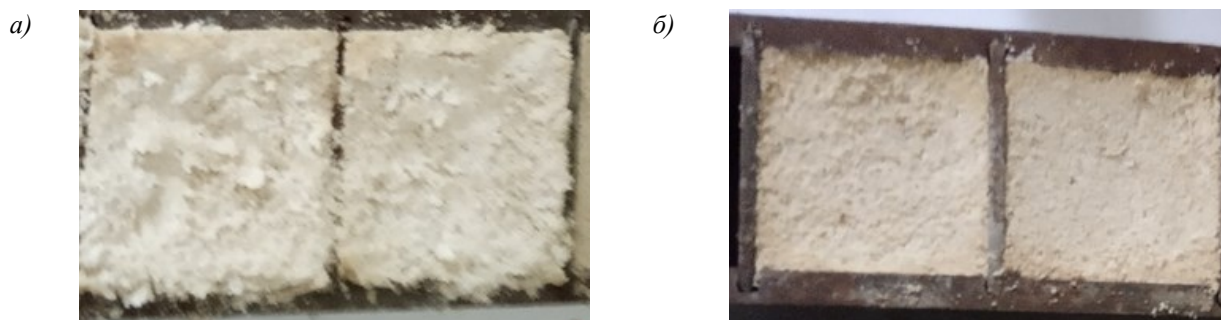


Рис. 2. Внешний вид образцов на основе тарных стёкол, активированных 5-% раствором:

Таким образом, можно сделать вывод о том, что для листовых и тарных стекол щелочные агенты Na_2CO_3 и Na_2SiO_3 не работают как активаторы, поэтому стеклянный наполнитель нужно использовать в комбинации с цементом для получения композиционного вяжущего.

На первом этапе эксперимента было установлено, что прочностные характеристики у тарного стекла больше. Для проведения дальнейших

исследований заформованы образцы на основе тарного стекла, цемента без активирующего агента и образцы на основе тарного стекла, цемента с активирующими агентами. Активирующий агент применялся в виде 3 %-го и 5 %-го растворов (табл. 2). Экспериментальные образцы подвергались сушке при температуре 70°C в течение 10 часов, далее набор прочности происходил при нормальных условиях твердения.

Таблица 2

Экспериментальные составы композиционных вяжущих на основе тарного стекла

№ состава	Цемент, %	Стеклопорошок, %	Сода (Na_2CO_3), %	Жидкое стекло (Na_2SiO_3), %
1	100	—	—	—
2	90	10	—	—
3	80	20	—	—
4	70	30	—	—
5	90	10	3	—
6	90	10	5	—
7	80	20	3	—
8	80	20	5	—
9	70	30	3	—
10	70	30	5	—
11	90	10	—	3
12	90	10	—	5
13	80	20	—	3
14	80	20	—	5
15	70	30	—	3
16	70	30	—	5

Для изучения прочностных характеристик экспериментальных образцов композиционного вяжущего на основе тарного стекла с различным типом щелочных активаторов были определены показатели прочности для затвердевших систем в возрасте твердения 28 суток.

Варьирование концентрации щелочного активатора осуществляется с целью определения целесообразности применения его в композиционном вяжущем, а также оптимального его со-

держания, при котором можно достичь максимальной прочности на изгиб и на сжатие, а также не приводящего к высолообразованию в процессе эксплуатации.

Определение прочностных характеристик показало, что наибольшую прочность имели составы с жидким стеклом, чем составы со щелочным активатором соды. Наименьшая прочность была у образцов без активаторов (табл. 3, составы 1–4), что говорит о целесообразности

применения активаторов в составе композиционного вяжущего. На основании экспериментальных данных видно, что оптимальными являются

составы, где содержание активирующего агента составило 5 % от массы композиционного вяжущего (табл. 3, состав 6, 12).

Таблица 3

Показатели прочности образцов композиционных вяжущих на основе тарного стекла

№ состава	Прочность при сжатии, МПа	Прочность при изгибе, МПа
1	38,0	0,091
2	30,0	0,078
3	22,0	0,051
4	18,7	0,036
5	33,0	0,81
6*	38,0*	0,89*
7	29,0	0,36
8	30,0	0,45
9	30,0	0,12
10	35,0	0,17
11	36,0	1,3
12*	41,9*	1,7*
13	32,0	0,9
14	33,0	1,3
15	16,8	0,5
16	20,0	0,8

* – оптимальный состав

Как видно из таблицы 3, образцы с активатором Na_2SiO_3 имели наибольшую прочность как на сжатие, так и на изгиб, нежели образцы с активатором Na_2CO_3 .

Выводы. В ходе проведённых исследований можно сделать вывод о том, что для листовых и тарных стёкол щелочные агенты Na_2CO_3 и Na_2SiO_3 не работают как активаторы, поэтому стеклянный наполнитель необходимо использовать в комбинации с цементом для получения композиционного вяжущего. Определение прочностных характеристик композиционного вяжущего показало, что наибольшую прочность имели составы с жидким стеклом, чем составы с содой. Наименьшую прочность показали образцы без активаторов, что говорит о целесообразности применения данных активаторов в составе композиционного вяжущего. Установлено, что образцы с активатором Na_2SiO_3 имели наибольшую прочность как на сжатие, так и на изгиб, нежели образцы с активатором Na_2CO_3 . Следовательно, Na_2SiO_3 обладает наибольшей активирующей способностью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ключев С.В. Применение композиционных вяжущих для производства фибробетонов // Технологии бетонов. 2012. № 1–2 (66–67). С. 56–57.
2. Володченко А.А. Влияние искусственных гидросиликатов кальция на процессы твердения и свойства неавтоклавных силикатных материалов на основе нетрадиционного алюмосиликат-

ного сырья // Строительные материалы и изделия. 2020. Т. 3. № 2. С. 19–28. DOI: 10.34031/2618-7183-2020-3-2-19-28.

3. Вишневская Я.Ю., Трунов П.В., Калатоzi В.В., Бондаренко Д.О. Перспективы повышения эффективности фибробетонов за счет применения композиционных вяжущих // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. № 3. С. 35–37.

4. Кожухова Н.И., Чижов Р.В., Жерновский И.В., Логанина В.И., Строкова В.В. Особенности структурообразования геополлимерной вяжущей системы на основе перлита с использованием различных видов щелочного активатора // Строительные материалы. 2016. № 3. С. 61–64. DOI: 10.31659/0585-430X-2016-735-3-61-64.

5. Ерофеев В.Т., Федорцов А.П., Федорцов В.А. Повышение коррозионной стойкости цементных композитов активными добавками // Строительство и реконструкция. 2020. № 2 (88). С. 51–60. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-88-2-51-60.

6. Логанина В.И., Жерновский И.В., Жегера К.В., Структурообразование цементного камня в присутствии добавки на основе аморфных алюмосиликатов // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 3 (56). С. 142–148.

7. Bondarenko D.O., Strokova, V.V. Operating properties of the coating, depending on the composition during plasma-chemical modification // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 341. Article number 012141. DOI: 10.1088/1755-1315/341/1/012141.

8. Bondarenko, N.I., Bondarenko, D.O. Processes of forming protective and decorative coatings

on concrete at plasma treatment // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 945. Article number 012038. DOI: 10.1088/1757-899X/945/1/012038.

9. Strokova V., Bondarenko D. Heating rate and liquid glass content influence on cement brick dehydration // Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. 2019. P. 286–289. DOI: 10.1007/978-3-030-22974-0_68.

10. Бондаренко Д.О., Строкова В.В. Использование отходов промышленности для покрытий на мелкозернистом бетоне // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. 2018. № 10. С. 256–259.

11. Бондаренко Н.И., Бондаренко Д.О., Евтушенко Е.И. Исследование химического взаимодействия стекловолокна с продуктами гидратации цемента // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 12. С. 119–125. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-12-119-125.

12. Bondarenko N.I., Bondarenko D.O., Valusikh K.A. Smalt based on the broken colored container glasses // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 95. P. 274–279. DOI: 10.1007/978-3-030-54652-6_41.

13. Бондаренко Н.И. Исследование термических свойств стеклобетона // Научные технологии функциональных материалов: тезисы докладов VI Международной научно-технической конференции. СПб.: СПбГИКиТ, 2019. С. 77–78.

14. Ерофеев В.Т., Федорцов А.П., Богатов А.Д., Федорцов В.А. Оценка и прогнозирование физико-химического сопротивления стеклощелочных композитов и методы его повышения // Известия вузов. Строительство. 2017. № 6 (702). С. 5–14.

15. Kozhukhova N.I., Fomina E.V., Zhernovsky I.V., Strokova V.V., Chizhov R.V. The utilization ef-

ficiency of natural aluminosilicates in composite binders // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 670–671. P. 182–186. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.670-671.182.

16. Kozhukhova N.I., Chizhov R.V., Zhernovsky I.V., Strokova V.V. Structure formation of geopolymers perlite binder vs. type of alkali activating agent // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. Vol. 11. Issue 20. P. 12275–12281.

17. Голосова А.С., Клименко Н.Н., Делицын Л.М. Влияние вида щелочного активатора на структуру и механические свойства композиций на основе отходов ТЭК // Успехи в химии и химической технологии. 2019. Т. 33. № 4 (214). С. 51–53.

18. Строкова Я.А., Клименко Н.Н. Комплексная щелочно-щелочноземельная активация гранулированного доменного шлака // Успехи в химии и химической технологии. 2019. Т. 33. № 4 (214). С. 130–132.

19. Fernandez-Jimenez A., Palomo A., Sobrados I., Sanz J. The role played by the reactive alumina content in the alkaline activation of fly ashes // Microporous Mesoporous Materials. 2006. Vol. 91. P. 111–119. DOI:10.1016/j.micromeso.2005.11.015.

20. Liu Z., Zhang D., Li L., Wang J., Shao N., Wang D. Microstructure and phase evolution of alkali-activated steel slag during early age // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 204. P. 158–165. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.01.213.

21. Айлер Р. Химия кремнезема. М.: Мир, 1982. 416 с.

22. Малявский Н.И. Щелочносиликатные утеплители. Свойства и химические основы производства // Российский химический журнал. 2003. № 4. С. 39–45.

Информация об авторах

Бондаренко Надежда Ивановна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: bondarenko-71@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Басов Владислав Олегович, бакалавр 3-го курса кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: jeigjb@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Даценко Алёна Олеговна, магистрант 2-го курса кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: alenadacenko@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 22.09.2021 г.

© Бондаренко Н.И., Басов В.О., Даценко А.О., 2022

*Bondarenko N.I., Basov V.O., Dacenko A.O.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

*E-mail: bondarenko-71@mail.ru

DEVELOPMENT OF BINDING COMPOSITIONS USING GLASS WASTE

Abstract. The possibility of using glass waste as a binder for glass concrete is investigated. Today, the construction industry makes new demands on binders, along with the improvement of the production of Portland cement. The research is underway to study new types of binders. Disposal of glass waste is due to environmental and economic prerequisites. In the work, studies of the properties of glasses for obtaining binders are carried out. Using the X-ray fluorescence method, the chemical composition of container and sheet glass has been investigated, and the main oxides of the feedstock have been determined. An activating component has been selected for a composite binder. On the basis of experimental data, it is found that the most expedient use as an activator of water glass in an amount of 5% by weight of the composite binder. It is found that glass filler must be used in combination with cement to obtain a composite binder, since alkaline agents Na_2CO_3 and Na_2SiO_3 do not work as activators for glass powders. The optimal compositions of the composite binder have been determined and the strength properties of the obtained samples have been studied in detail. Compositions with an activator Na_2SiO_3 shows the highest strength indicators than compositions with an activator Na_2CO_3 .

Keywords: cullet, glass concrete, cement, composite binders, alkaline activator.

REFERENCES

1. Kluyev S.V. Composite binders use for the production of fiber-concretes [Primenenie kompozitsionnyh vyazhushchih dlya proizvodstva fibrobetonov]. Concrete Technologies. 2012. No. 1–2 (66–67). Pp. 56–57. (rus)
2. Volodchenko A.A. Influence of artificial calcium hydrosilicates on the hardening processes and properties of non-autoclave silicate materials based on unconventional aluminosilicate raw materials [Vliyanie iskusstvennyh gidrosilikatov kal'ciya na processy tverdeniya i svoystva neavtoklavnyh silikatnyh materialov na osnove netraditsionnogo alyumosilikatnogo syr'ya]. Construction Materials and Products. 2020. Vol. 3. No. 2. Pp. 19–28. DOI: 10.34031/2618-7183-2020-3-2-19–28. (rus)
3. Vishnevskaya J.Yu., Trynov P.V., Kalatozi V.V., Bondarenko D.O. Prospects for efficiency fiber reinforced concrete through the use of composite binders [Perspektivy povysheniya effektivnosti fibrobetonov za schet primeneniya kompozitsionnykh vyazhushchikh]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2013. No. 3. Pp. 35–37. (rus)
4. Kozhukhova N.I., Chizhov R.V., Zhernovsky I.V., Loganina V.I., Strokova V.V. Features of structure formation of a geo-polymeric binding system on the basis of perlite with the use of different types of alkali activators [Features of the structure formation of a geopolymer binding system based on perlite using various types of alkaline activator]. Construction Materials. 2016. No. 3. Pp. 61–64. DOI: 10.31659/0585-430X-2016-735-3-61-64. (rus)
5. Erofeev V.T., Fedortsov A.P., Fedortsov V.A. The increasing of corrosive resistance of cement composites by active additives [Povyshenie korrozionnoj stojkosti cementnykh kompozitov aktivnymi dobavkami]. Building and reconstruction. 2020. No. 2 (88). Pp. 51–60. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-88-2-51-60. (rus)
6. Loganina V.I., Zhernovskiy I.V., Zhegera K.V. Pattern formation of cement stone in the presence of additive based on amorphous aluminum silicates [Strukturoobrazovanie cementnogo kamnya v prisutstvii dobavki na osnove amorfnykh alyumosilikatov]. Bulletin of Civil Engineers. 2016. No. 3 (56). Pp. 142–148. (rus)
7. Bondarenko D.O., Strokova, V.V. Operating properties of the coating, depending on the composition during plasma-chemical modification. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 341. Article number 012141. DOI: 10.1088/1755-1315/341/1/012141.
8. Bondarenko N.I., Bondarenko D.O. Processes of forming protective and decorative coatings on concrete at plasma treatment. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 945. Article number 012038. DOI: 10.1088/1757-899X/945/1/012038.
9. Strokova V., Bondarenko D. Heating rate and liquid glass content influence on cement brick dehydration. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. 2019. Pp. 286–289. DOI: 10.1007/978-3-030-22974-0_68.
10. Bondarenko D.O., Strokova V.V. Application of industrial waste for coatings on fire-grained concrete [Ispol'zovaniye otkhodov promyshlennosti dlya pokrytiy na melkozernistom betone]. Resource-efficient technologies in the construction complex of the region. 2018. No. 10. Pp. 256–259. (rus)
11. Bondarenko N.I., Bondarenko D.O., Evtushenko E.I. Study of the chemical interaction of glass fiber with cement hydration products [Issledovaniye khimicheskogo vzaimodeystviya steklovolokna s produktami gidratatsii tsementa]. Bulletin of BSTU

named after V.G. Shukhov. 2020. No. 12. Pp. 119–125. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-12-119-125. (rus)

12. Bondarenko N.I., Bondarenko D.O., Valusikh K.A. Smalt based on the broken colored container glasses. Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 95. Pp. 274–279. DOI: 10.1007/978-3-030-54652-6_41.

13. Bondarenko N.I. Investigation of the thermal properties of glass concrete [Issledovaniye termicheskikh svoystv steklobetona]. Functional materials high technology: Abstracts VI International scientific and technical conference. SPb.: SPbGKIIT, 2019. Pp. 77–78. (rus)

14. Erofeev V.T., Fedortsov A.P., Bogatov A.D., Fedortsov V.A. Assessment and forecasting of physical and chemical resistance of glass alkali composites and methods of his increase [Ocenka i prognozirovaniye fiziko-himicheskogo soprotivleniya stekloshchelochnykh kompozitov i metody ego povysheniya]. News of higher educational institutions. Construction. 2017. No. 6 (702). Pp. 5–14. (rus)

15. Kozhukhova N.I., Fomina E.V., Zhernovsky I.V., Strokova V.V., Chizhov R.V. The utilization efficiency of natural aluminosilicates in composite binders. Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 670–671. Pp. 182–186. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.670-671.182.

16. Kozhukhova N.I., Chizhov R.V., Zhernovsky I.V., Strokova V.V. Structure formation of geopolymer perlite binder vs. type of alkali activating agent. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. Vol. 11. No. 20. Pp. 12275–12281.

Information about the authors

Bondarenko, Nadezhda I. PhD. E-mail: bondarenko-71@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Basov, Vladislav O. Student. E-mail: jeigjb@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Dacenko, Alena O. Student. E-mail: alena-dacenko@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 22.09.2021

Для цитирования:

Бондаренко Н.И., Басов В.О., Даценко А.О. Разработка составов вяжущих с использованием стеклоотходов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 1. С. 83–89. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-83-89

For citation:

Bondarenko N.I., Basov V.O., Dacenko A.O. Development of binding compositions using glass waste. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 1. Pp. 83–89. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-83-89

17. Golosova A.S., Klimenko N.N., Delitsyn L.M. Influence of the alkaline activator type on the structure and mechanical properties of compositions based on waste of the fuel and energy complex [Vliyaniye vida shchelochnoy aktivatora na strukturu i mekhanicheskiye svoystva kompozitsiy na osnove otkhodov TEK]. Advances in Chemistry and Chemical Technology. 2019. Vol. 33. No. 4 (214). Pp. 51–53. (rus)

18. Strokova Ya.A., Klimenko N.N. Complex alkaline-alkaline earth activation of granulated blast furnace slag [Kompleksnaya shchelochno-shchelochnozemel'naya aktivatsiya granulirovannogo domennogo shlaka]. Advances in Chemistry and Chemical Technology. 2019. Vol. 33. No 4 (214). Pp. 130–132. (rus)

19. Fernandez-Jimenez A., Palomo A., Sobrados I., Sanz J. The role played by the reactive alumina content in the alkaline activation of fly ashes. Microporous Mesoporous Materials. 2006. Vol. 91. Pp. 111–119. DOI:10.1016/j.micromeso.2005.11.015.

20. Liu Z., Zhang D., Li L., Wang J., Shao N., Wang D. Microstructure and phase evolution of alkali-activated steel slag during early age. Construction and Building Materials. 2019. Vol. 204. Pp. 158–165. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.01.213.

21. Ayler R. Chemistry of Silica [Khimiya kremnezema]. Moscow: Mir, 1982. 416 p. (rus)

22. Malyavskii N.I. Alkaline silicate heaters. Properties and chemical bases of production [Shchelochnosilikatnyye utepliteli. Svoystva i khimicheskiye osnovy proizvodstva]. Russian Chemical Journal. 2003. No. 4. Pp. 39–45. (rus)

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-90-101

Никитина И.П., Поляков А.Н., Воронин Д.Г.Оренбургский государственный университет***E-mail: innanikitina@list.ru*

СИМУЛЯЦИЯ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ ДВУСТОРОННИХ ТОРЦЕШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКОВ

Аннотация. В работе представлен результат моделирования термодетформационного поведения несущей системы двустороннего торцешлифовального станка, рассмотренного для двух режимов его работы: на холостом и рабочих ходах. В качестве основных источников тепла рассматривались шпиндельные подшипники, тепловые потоки от смазочно-охлаждающей жидкости, тепловые потоки от двигателей. Предварительные значения тепловых и конвективных потоков назначались по известным методикам, применяемых в инженерных расчётах станков. Уточнение значений тепловых и конвективных потоков осуществлялось по результатам экспериментальных значений температур и температурных перемещений. В тепловой модели конвективный теплообмен был назначен для 450 поверхностей. Тепловые потоки были назначены для 161 поверхности. Симуляция проводилась в Ansys для 6 часов работы станка. В качестве типового конечного элемента в Ansys использован десятиузловой элемент Solid227. Задача термоупругости решалась в связанной постановке. Погрешность моделирования тепловых процессов не превысила 0,5 °С, погрешность моделирования температурных перемещений не превысила 5 мкм. Результаты компьютерного моделирования подтвердили характерные для данной гаммы станков относительные экспериментальные положения левого и правого шлифовальных кругов. На холостом ходу взаимное положение шлифовальных кругов представляло состояние «внизу шире», а на рабочем ходу было зафиксировано состояние «внизу уже». Представлены иллюстрации сеточной модели и контурные графики для температурного поля и температурных перемещений несущей системы станка для двух режимов его работы.

Ключевые слова: торцешлифовальные станки, температурные деформации, теплоустойчивость, повышение точности, методики.

Введение. Системные исследования влияния тепловых процессов на точность станков были начаты ещё в 50 годах. Однако, сегодня, несмотря на всеобщую цифровизацию экономики, по-прежнему остаются актуальными тепловые проблемы, возникающие в металлорежущих станках [1–7]. Это объясняется ростом скоростей резания и подач [8, 9]. Сегодня, благодаря усилиям отечественных и зарубежных исследователей, сформирована общая концепция исследований тепловых процессов в металлорежущих станках [1–7]. Исследованы основные источники тепловыделения в станках [10], тепловое поведение отдельных узлов станка, влияние температурных деформаций обрабатываемых деталей на их выходную точность [11]. Экспериментально определены коэффициенты теплоотдачи для деталей станка, коэффициенты теплопроводности стыков. Разработаны различные методики инженерных расчётов и компьютерного моделирования [1, 12–14].

Сегодня с более широким внедрением систем компьютерного моделирования в область тепловых исследований станков приобретают особую значимость интеллектуальные технологии компенсации температурной погрешности станков [15–23].

Рынок современных систем инженерного анализа достаточно объёмен и превышает 7 млрд. долларов США с положительной тенденцией роста более 20 % в год, начиная с 2016 года [24]. Среди наиболее известных на мировом рынке вэндоров CAE-систем: Ansys, Dassault Systems, Siemens PLM Software, MSC Software, Altair Engineering, Cybernet Systems, ESI Group, Autodesk, CD-Adapco, Comsol, MAYA, PTC [25].

Несмотря на то, что сегодня вычислительная производительность компьютеров многократно превышает производительность компьютеров, на которых выполнялось моделирование первых отечественных систем инженерного анализа, реальная производительность компьютеров, используемых в научных исследованиях станков в стране и мире, а также упрощённые трибологические модели тепловых источников, ограничивают возможности реализации подробных расчётных моделей станков. Поэтому по-прежнему при разработке расчётных моделей станков актуально применение различных упрощений, главными из которых являются следующие: в качестве основных тепловых источников принимаются подшипники, тепловыделение в которых не зависит от времени. Теплоотдача учитывается в

виде конвективного теплообмена. Коэффициенты теплоотдачи также принимаются постоянными. Влияние стыков в сопряжениях не учитывается.

При исследовании двусторонних торцевшлифовальных станков в работе в качестве основного инструмента моделирования термомеханического поведения несущей системы станка (расчёт нестационарных температурных полей и температурных деформаций) использован Ansys [26]. Этот инструмент широко известен в мире и России, и его позиции ещё больше укрепляются за счёт создания нового продукта Ansys Twin Builder, который используется для набирающих силу технологий создания цифровых двойников [27].

Общие положения расчета температурных полей. Анализ несущей системы торцевшлифовального станка позволяет представить её деталями двух типов: коробчатыми и телами вращения.

К первому типу относятся корпуса шпиндельных бабок и станины. Ко второму типу относятся шпиндельные узлы, состоящие из шпинделя и корпуса пиноли, являющиеся телами вращения.

В качестве типового конечного элемента в Ansys использован десятиузловой элемент Solid227.

При проектировании гаммы торцевшлифовальных станков их расчётные модели различаются как интенсивностью и месторасположением источников тепловыделений, так и конструктивным исполнением, определяемым способом подачи заготовки в зону обработки. Это

условие определяет особенность разрабатываемой универсальной расчетной модели торцевшлифовального станка, которая бы учитывала возможные особенности конструктивного исполнения, расположение тепловых источников и поверхностей теплообмена, что определяет степень влияния температурных смещений кругов на точность обработки [28–30].

Разработка расчетной схемы, учитывающей особенности конструктивного исполнения двусторонних торцевшлифовальных станков с горизонтальным расположением шпинделей. Конструкцию торцевшлифовальных станков данного типа (рис. 1) отличает то, что шпиндельный узел расположен в пиноли, которая обеспечивает ограниченный теплоотвод от шпиндельного узла в корпус шпиндельной бабки. Теплоотвод от шпиндельного узла в пиноль ограничен прокачиваемой смазочно-охлаждающей жидкостью (СОЖ) по каналу, выполненному внутри шпинделя. Шпиндельная бабка состоит из двух частей, на нижней части которой установлена пиноль. Шпиндельные бабки (нижней частью) соответственно контактируют со станиной и имеют симметричное расположение относительно оси симметрии, проходящей через центр станины. Теплоотвод от шпиндельных бабок в станину ограничен вследствие конструктивного исполнения корпусов шпиндельных бабок и станины. Ограждение зоны шлифования (на рис. 1 не показано) контактирует со станиной и шпиндельными бабками с ограниченным теплоотводом за счет полимерных прокладок.

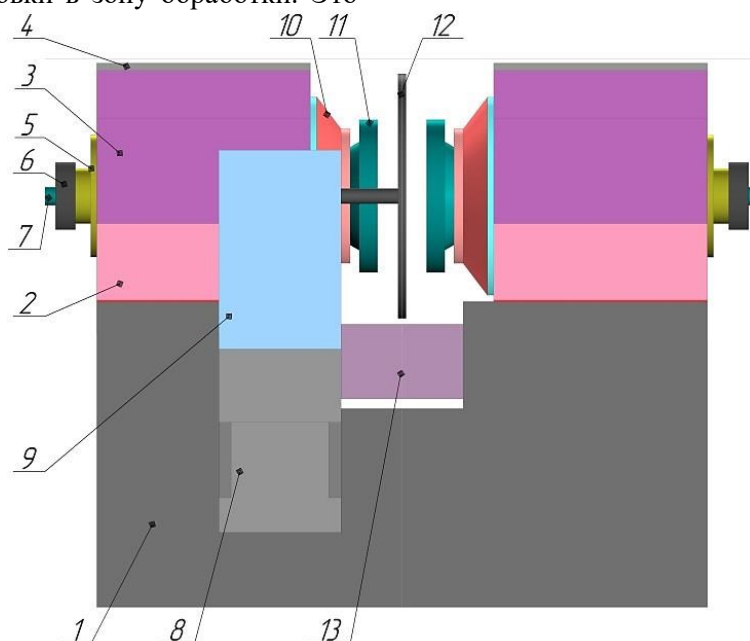


Рис. 1. Модель станка:

- 1 – станина; 2 – бабка нижняя; 3 – бабка верхняя; 4 – крышка верхняя; 5 – крышка торцовая; 6 – шкив;
7 – шпиндельный узел; 8 – тумба; 9 – редуктор; 10 – защитное устройство от СОЖ;
11 – фланец шпиндельного узла, к которому крепится шлифовальный круг; 12 – диск подачи

Температурные деформации стенок корпусов шпиндельных бабок и станины определяют смещение шпинделя в вертикальной плоскости.

Анализ конструкции, условий теплообмена, условий закрепления узлов, позволил представить термодинамическую систему торцевшлифовального станка данного типа в виде расчетной модели, состоящей из следующих групп узлов:

– шпиндельный узел, включающий шпиндель, подшипники и пиноль;

– корпус шпиндельной бабки, состоящий из двух частей и направляющие;

– корпус станины с тумбой, редуктором и диском подачи.

Схема назначения граничных условий станка представлена на рис. 2 для центральной части станины и левой половины станка (для правой половины станка условия идентичны).

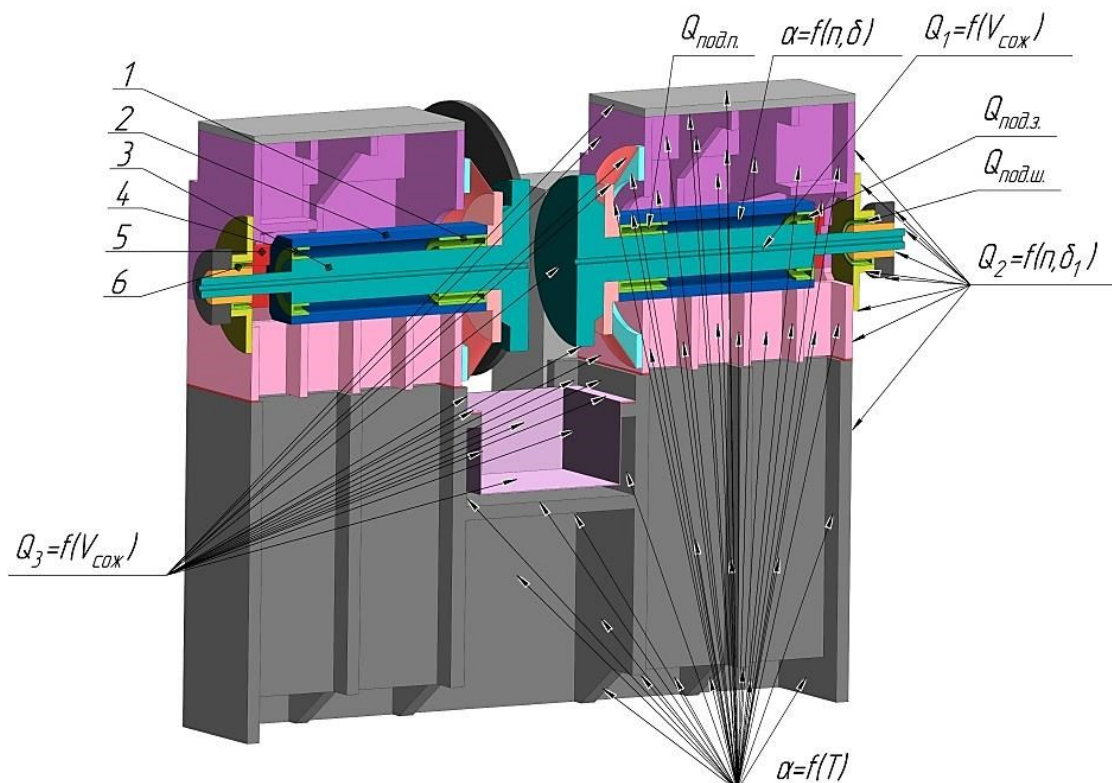


Рис. 2. Модель станка с граничными условиями (сечение, вид сзади):

$Q_{\text{под.п.}}, Q_{\text{под.з.}}, Q_{\text{под.ш.}}$ – тепловые потоки от подшипников; $Q_1=f(V_{\text{сож}}), Q_3=f(V_{\text{сож}})$ – тепловые потоки от СОЖ; $Q_2=f(n, \delta_1)$ – тепловой поток от электродвигателя и ременной передачи;

δ_1 – расстояние до вращающегося шкива; δ – расстояние до вращающегося шпинделя; 1 – передний подшипник; 2 – пиноль; 3 – шпиндель; 4 – задний подшипник; 5 – направляющая; 6 – подшипник шкива

При разработке расчётной модели для определения температурного поля несущей системы станка были сделаны следующие допущения:

– основными источниками тепла в шпиндельном узле считались подшипники качения, представляемые в виде распределенных потоков тепла в местах посадки подшипников;

– мощность тепловыделения для подшипников определялась в ходе решения задачи идентификации тепловой модели, для этого использовались результаты экспериментов [29, 30], при этом распределение значений тепловых потоков от подшипника между внутренними и наружными поверхностями модели подшипника принималось пропорционально этим площадям;

– другие источники тепла (гидросистема, пары трения) также рассматривались как распре-

деленные тепловые потоки; мощность тепловыделения, как и для подшипников, также определялась по экспериментальным данным температур и температурных перемещений;

– шпиндельный узел рассматривался в условиях действия сложного теплообмена при одновременном действии теплопроводности и конвекции;

– конвективный теплообмен для несущей системы реализован явным заданием коэффициентов теплоотдачи с учётом условий теплообмена (свободная или вынужденная конвекция; поверхности, расположенные в кольцевом зазоре или расположенные в большом пространстве и т. д.);

– все геометрические параметры элементов геометрической модели несущей системы станка назначались по рабочим чертежам;

– конструкции корпусов станины и шпиндельной бабки имеют коробчатую форму с системой внутренних перегородок, связывающих переднюю, заднюю и торцовые стенки, и обеспечивающие жесткость конструкции;

– материалы расчётной модели: чугун, конструкционная и легированная сталь, полиуретан;

– общее время моделирования работы станка разбивалось на отдельные интервалы времени, в пределах которых, все параметры модели принимались не зависящими от времени;

– в расчётной модели небольшие отверстия в стенках не учитывались;

– стенки с перепадами по высотам менее 20 мм заменялись пластинками некоторой приведенной высотой при сохранении эквивалентной жесткости.

Разработанная конечно-элементная модель станка содержит более 335000 конечных элементов и более 513000 узлов (рис. 3).

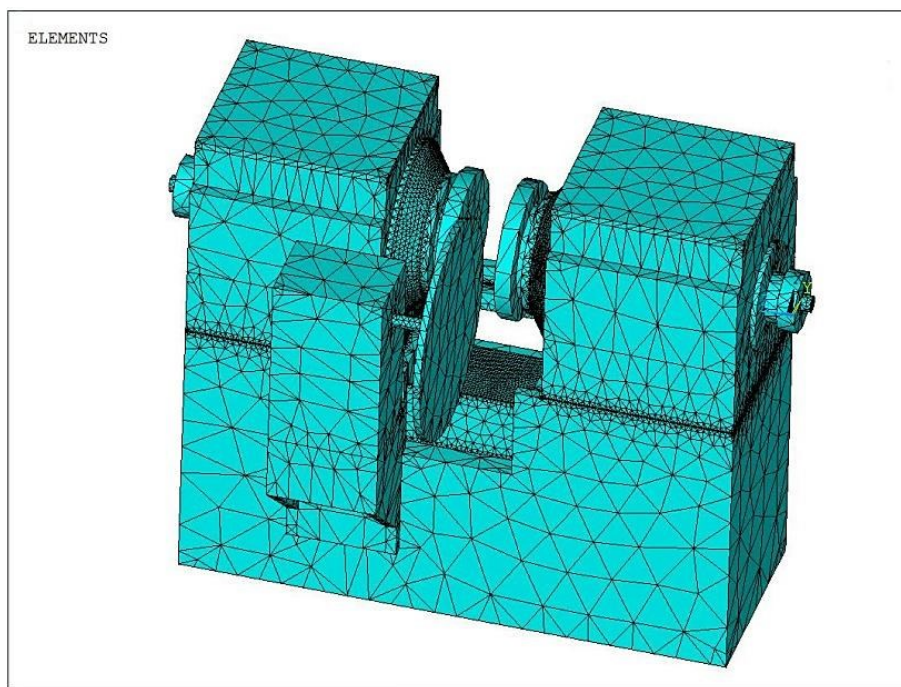


Рис. 3. Конечноэлементная модель станка

Назначение граничных условий. Анализ схемы расположения источников теплоты и их действия в термодинамической системе станка показывает, что исходными данными для расчета температурного поля торцевшлифовального станка является количество теплоты, выделяемое процессом шлифования, электродвигателями (электрические и магнитные потери), ременной передачей и подшипниками.

Оценочный расчёт мощности тепловыделения для тепловых источников проводился по известным методикам [1–7].

Коэффициент теплоотдачи α , характеризующий интенсивность процесса теплоотдачи, зависит от большого числа факторов. На величину α влияют геометрические размеры тела, скорость и характер движения охлаждающей среды, физические параметры используемого охладителя, режим работы. Граничные условия, характеризующие теплообмен поверхностей несущей системы станка, также назначались в соответствии с известными рекомендациями для металлорежущих станков [1–7].

Коэффициенты теплоотдачи назначались для тех поверхностей, которые наиболее существенно оказывали влияние на формирование температурного поля станка: поверхности шпиндельного узла, поверхности корпусов станины и шпиндельной бабки, обращенные к ременной передаче, а также поверхности станины и шпиндельных бабок, омываемые СОЖ.

Поверхности вращающегося шпинделя, на которых установлены подшипники, участвуют в теплообмене с коэффициентом теплоотдачи, зависящим от частоты вращения:

$$Nu = 0,095(0,5 \cdot Re_{окр}^2 + Gr)^{0,35}, \quad (1)$$

где Nu – безразмерный коэффициент теплоотдачи; $Re_{окр}$ – критерий Рейнольдса для радиального движения воздушных потоков (безразмерная величина); Gr – число Грасгофа (безразмерная величина):

$$Nu = \frac{\alpha \cdot D_э}{\lambda}, \quad (2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м²·°С; D_3 – эквивалентный диаметр, м:

$$D_3 = 2\delta, \quad (3)$$

где δ – расстояние между шпинделем и корпусом (пинолью), м:

$$Re_{окр} = \frac{v_{окр} \cdot D_3}{\nu}, \quad (4)$$

где ν – вязкость охладителя, м²/с; $v_{окр}$ – окружная скорость вращения шпинделя, м/с:

$$Nu = 0,18 Re_{окр}^{0,8} \cdot Pr^{0,3} \{1 - th[1 + 1,75 \cdot 10^{-4} \cdot Re_{окр} / Re_{ос}^{0,685} - \exp(-0,03 \cdot Re_{окр} \cdot Re_{ос}^{0,685})]\}, \quad (7)$$

где Pr – число Прандтля для СОЖ; th – гиперболический тангенс; $Re_{ос}$ – критерий Рейнольдса для осевого движения воздушных потоков:

$$Re_{ос} = \frac{v_{ос} \cdot D_3}{\nu}, \quad (8)$$

где $v_{ос}$ – осевая скорость потока охладителя, м/с.

$$Pr = \frac{\nu_{охл}}{a_{охл}}, \quad (9)$$

где $a_{охл}$ – температуропроводность охладителя, м²/с; $\nu_{охл}$ – вязкость охладителя, м²/с.

Теплоотдача поверхностей, расположенных на небольшом расстоянии δ от вращающихся деталей, зависит от вентиляционного эффекта, создаваемого вращающимися частями. К таким поверхностям относится внутренняя поверхность пиноли, обдуваемая вращающимся шпинделем.

Теплоотдача наружных поверхностей пиноли зависит от температуры окружающего воздуха в условиях отсутствия вентиляции. Коэффициент теплоотдачи наружной поверхности пиноли принят равным 5 Вт/м²·°С, при температуре окружающей среды для данной поверхности 20 °С.

Торцовые стенки (внешняя поверхность) корпуса шпиндельных бабок участвуют в теплообмене с коэффициентом теплоотдачи, зависящим от вентиляционного эффекта, создаваемого вращающимися шкивами ременной передачи $\alpha = f(n, \delta_1)$. С другого торца, в центральной части станка, часть поверхности корпусов шпиндельных бабок ограничены защитным устройством от СОЖ. Теплоотдача остальных внешних стенок и внутренних поверхностей зависит от температуры окружающего воздуха в условиях отсутствия вентиляции, то есть со свободным движением воздуха. Принимаем коэффициент теплоотдачи данных поверхностей равным 5 Вт/м²·°С, температура окружающей среды также принята

$$v_{окр} = \pi d_{шп} \cdot n. \quad (5)$$

где $d_{шп}$ – диаметр шпинделя, м; n – частота вращения шпинделя об/с.

$$Gr = g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot D_3^3 / \nu^2, \quad (6)$$

где β – температурный коэффициент объемного расширения; g – ускорение свободного падения, м/с; ΔT – избыточная температура, °С.

Внутренняя поверхность шпинделя, образующая отверстия для подачи СОЖ, имеет коэффициент теплоотдачи равный:

равной 20 °С.

Поверхности поддона, расположенного внутри станины, по которым течет СОЖ, имеют коэффициент теплоотдачи как функция от скорости потока СОЖ, определяемый по формуле (при турбулентном режиме):

$$Nu = 0,037 \cdot Re_{охл}^{0,8} \cdot Pr_{охл}^{0,43} (Pr_{охл} / Pr_c)^{0,25}. \quad (10)$$

где $Re_{охл}$ – критерий Рейнольдса; $Pr_{охл}$ – число Прандтля для параметров СОЖ с температурой набегающего потока; Pr_c – число Прандтля для параметров СОЖ, равной температуре стенок поддона; Nu – безразмерный коэффициент теплоотдачи:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda_{охл}}. \quad (11)$$

где $\lambda_{охл}$ – теплопроводность охладителя (СОЖ), Вт/м²·°С; l – длина стенки, обтекаемой (обдуваемой) охладителем, м.

$$Re_{охл} = \frac{v_{охл} \cdot l}{\nu_{охл}}. \quad (12)$$

где $v_{охл}$ – средняя скорость потока охладителя, м/с.

Теплофизические параметры для СОЖ принимались из каталогов производителей СОЖ. В тепловой модели конвективный теплообмен был назначен для 450 поверхностей. Тепловые потоки (Heat Flux) были назначены для 161 поверхности.

Расчет температурных деформаций станка. Практика производства показала, что в станках данной группы температурные деформации оказывают определяющее влияние на точность обрабатываемых деталей. Поэтому расчёт температурных деформаций торцешлифовального станка обязательно проводят на стадии проектирования.

Температурное поле станка является причи-

ной возникновения в его несущей системе температурных деформаций. Для этого в Ansys предусмотрено решение задачи термоупругости в двух постановках: несвязанной и связанной [31]. При решении задачи в несвязанной постановке для первоочередного расчёта температурного поля станка используют элементы Solid70 или Solid90. А затем для этой же сеточной модели выполняют решение задачи статики с элементами Solid185/Solid186. Использование конечных элементов типа Solid226 или Solid227 позволяет реализовать связанную задачу термоупругости. В этом случае затраты на разработку итоговой расчётной модели сокращаются. Однако, вычислительные затраты на идентификацию тепловой модели существенно возрастают, так как одновременно строится температурное поле и поле температурных деформаций (или температурных перемещений). Температурные деформации рассчитываются на той же сетке разбиения, что и расчет температурного поля. При расчете температурных деформаций приняты следующие допущения: материал конструкции работает в упругой области; нижнее основание станины жестко закреплено в восьми узлах.

На точность обрабатываемой детали, как отмечалось в [28, 29], влияет изменение взаимного положения рабочих торцов двух шлифовальных кругов относительно диска подачи заготовок по координатам X, Y, Z (ΔX , ΔY , ΔZ). Перемещения по оси Y компенсируются износом шлифовальных кругов и величиной их подналадки в процессе шлифования. Перемещения по оси X (в плоскости XY) практически не оказывают влияния на качество обработки. Наиболее важно определить перемещения по оси Z (в плоскости YZ), оказывающие существенное влияние на точность обрабатываемой детали.

Проверка адекватности принятой расчётной модели. Для подтверждения принятых допущений в расчётной модели и назначенных граничных условий при расчете температурного поля и температурных деформаций был проведен машинный эксперимент для станка модели 3А343АДФ2 при условиях, соответствующих реальным условиям работы станка на холостом ходу и при работе под нагрузкой (при принятой мощности равной 6 кВт). Получено удовлетворительное совпадение результатов эксперимента [29, 30] и расчёта. Погрешность расчётных и экспериментальных данных не превысила 0,5 °С. Результаты расчёта температурного поля станка, изменение температуры характерных точек и тепловых перемещений шлифовальных кругов приведены на рис. 4–7. На рис. 5 приведены изменения температуры для точек 1, 2, 4, 5, 7, 23, в которых были установлены термодатчики [30].

Из расчётов было получено подтверждение предположения, о симметричности распределения тепловых деформаций (в Ansys – температурных перемещений) станины относительно своего центра (рис. 6). Также было подтверждено, что несимметричность температурных перемещений шлифовальных кругов возникает относительно диска подачи заготовок. Тумба, на которой установлен редуктор диска подачи и закрепленная левее центра станины, имела температурные перемещения того же порядка, что и левая часть станины. Картина температурных перемещений станка на холостом ходу и при работе под тепловой нагрузкой представлена на рис. 6а и 6б, соответственно. Погрешность расчётных и экспериментальных данных не превысила 5 мкм. Оценка адекватности модели проводилась по критерию Фишера.

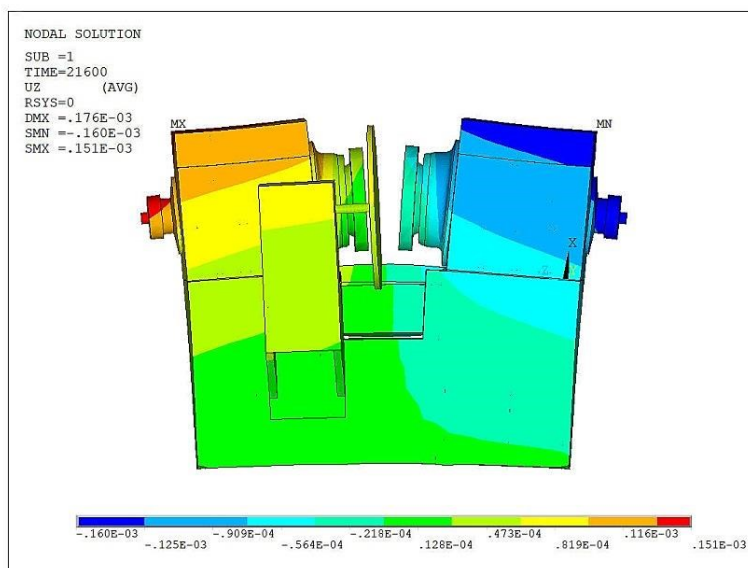


Рис. 4. Результат расчета температурного поля станка

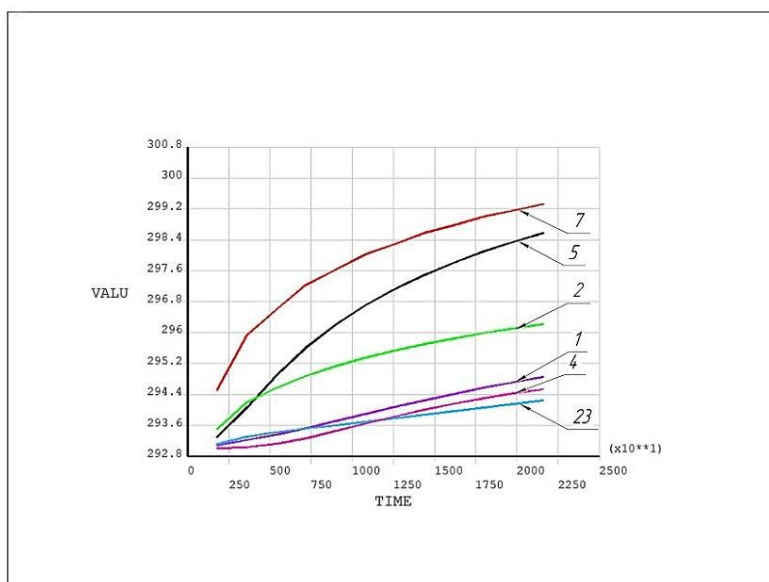
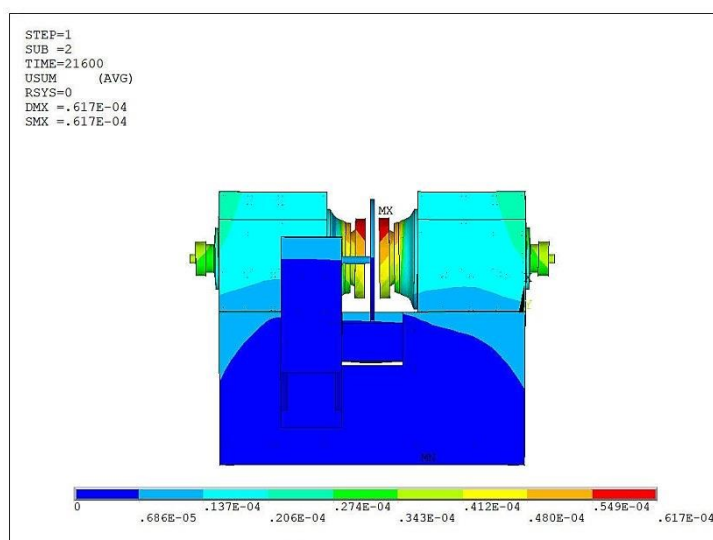
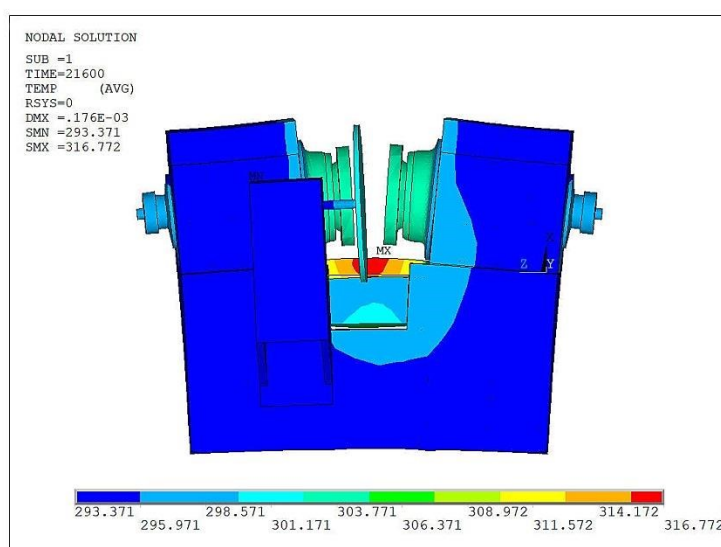


Рис. 5. Результат изменения температуры характерных точек станка



а



б

Рис. 6. Картина тепловых деформаций станка:
а – холостой ход («внизу шире»); б – работа под тепловой нагрузкой («внизу уже»)

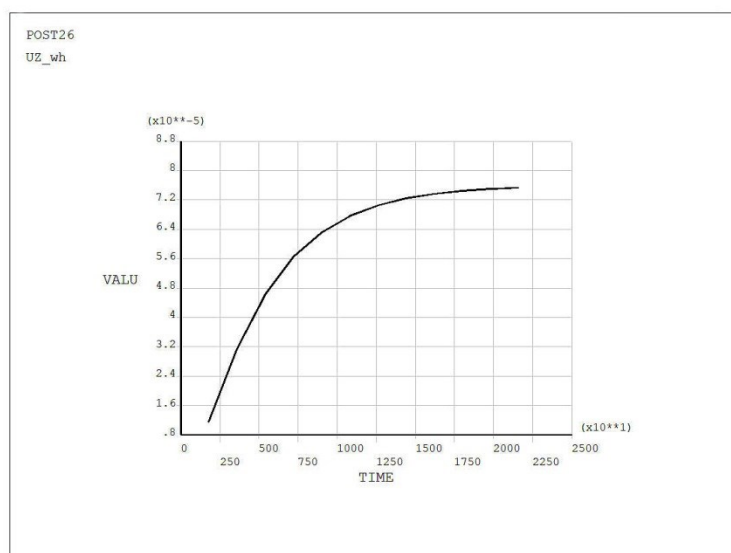


Рис. 7. Результат расчета тепловых перемещений шлифовальных кругов

Выводы.

1. Применение известных методик построения упрощенных тепловых и деформационных моделей построения температурных полей и температурных перемещений несущей системы станка позволило провести компьютерное моделирование двустороннего торцешлифовального станка горизонтального исполнения, отличающегося повышенной теплонапряженностью и особенностями конструктивного исполнения.

2. Погрешность моделирования тепловых процессов не превысила $0,5^{\circ}\text{C}$, погрешность моделирования температурных перемещений не превысила 5 мкм. Проверка адекватности модели была выполнена по критерию Фишера. Особенностью построения расчётной модели являлся учёт двух процессов работы станка – на холостом и рабочем ходах. Хорошее соответствие экспериментальных и расчётных результатов позволяет считать принятые допущения справедливыми и использовать эту расчётную модель торцешлифовального станка для исследования тепловых характеристик торцешлифовальных станков данной гаммы. Полученные результаты моделирования позволяют сделать заключение о возможном использовании данной упрощенной модели для последующих вычислительных исследований влияния конструктивных решений на выходную точность станка и при создании цифрового двойника этого типа станков.

Источник финансирования. Исследование выполнено при финансовой поддержки из федерального бюджета в 2021 году гранта в форме субсидии на реализацию программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» в рамках соглашений № 075-15-2021-1171, 075-15-2021-1112.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Поляков А.Н. Компьютерные исследования тепловых деформаций металлорежущих станков. Методы, модели и алгоритмы: учебное пособие. Оренбург: ГОУ ОГУ, 2003. 382 с.
2. Ito Y. Thermal Deformation in Machine Tools. McGraw Hill Professional. 2010. 240 p.
3. Mayr J., Jedrzejewski J., Uhlmann E., Alkan Donmez M., Knapp W., Härtig F., Wendt K., Moriwaki T., Shore P., Schmitt R., Brecher C., Würz T., Wegener K. Thermal issues in machine tools // CIRP Ann Manuf Technol. 2012. Vol. 61. Is. 2. Pp. 771–791.
4. Кузнецов А.П. Тепловое поведение и точность металлорежущих станков. М.: МГТУ «Станкин», Янус-К, 2011. 255 с.
5. Bryan J. International status of thermal error research // CIRP Ann Manuf Technol. 1990. Vol. 39. Is. 2. Pp. 645–656.
6. Кузнецов А.П. Тепловой режим металлорежущих станков. М.: МГТУ «Станкин», Янус-К, 2013. 480 с.
7. Кузнецов А.П. Тепловые процессы в металлорежущих станках. М.: Техносфера, 2019. 488 с.
8. Bushuev V.V., Kuznetsov A.P., Khomyakov V.S., Molodtsov V.V. Precision and Efficiency of Metal-Cutting Machines // Russian Engineering Research. 2016. Vol. 36. Is. 9. Pp. 762–773.
9. Bushuev V.V., Kuznetsov A.P., Sabirov F.S., Khomyakov V.S., Molodtsov V.V. Trends in Research on Metal-Cutting Machines // Russian Engineering Research. 2016. Vol. 36. Is. 6. Pp. 488–495.
10. Fu G., Tao C., Xie Y., Lu C., Gao H. Temperature-sensitive point selection for thermal error modeling of machine tool spindle by considering

heat source regions // *Int J Adv Manuf Technol.* 2021. Vol. 112. Pp. 2447–2460.

11. Fan J., Wang P., Tao H., Pan R. A thermal deformation prediction method for grinding machine' spindle // *Int J Adv Manuf Technol.* 2021. Vol. 75.

12. Naumann A., Ruprecht D., Wensch, J. Toward transient finite element simulation of thermal deformation of machine tools in real-time // *Comput Mech.* 2018. Vol. 62. Pp. 929–942.

13. Ge Z., Ding X. Thermal error control method based on thermal deformation balance principle for the precision parts of machine tools // *Int J Adv Manuf Technol.* 2018. Vol. 97. Pp. 1253–1268.

14. Fang B., Gu T., Ye D., Luo T. An improved thermo-mechanical model for vertical machining center // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016. Vol. 87. Pp. 2581–2592.

15. Поляков А.Н., Гончаров А.Н. Снижение температурной погрешности станков с ЧПУ на основе управления движением их рабочих органов: монография. – Саратов: Вузовское образование, 2019. 199 с.

16. Li Y., Zhao W., Lan S., Ni J., Wu W., Lu B. A review on spindle thermal error compensation in machine tools // *International Journal of Machine Tools and Manufacture.* 2015. Vol. 95, Pp. 20–38.

17. Liu S., Lin M. Thermal–Mechanical Coupling Analysis and Experimental Study on CNC Machine Tool Feed // *Mechanism. Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 2019. Vol. 20. Pp. 993–1006.

18. Zhang T., Ye W., Liang R., Lou P., Yang X. Temperature variable optimization for precision machine tool thermal error compensation on optimal threshold // *Chin. J. Mech. Eng.* 2013. Vol. 26. Pp. 158–165.

19. Cao H., Zhu L., Li X., Chen P., Chen Y. Thermal error compensation of dry hobbing machine tool considering workpiece thermal deformation // *Int J Adv Manuf Technol.* 2016. Vol. 86. Pp. 1739–1751.

20. Li T., Li F., Jiang Y., Wang H. Thermal error modeling and compensation of a heavy gantry-type machine tool and its verification in machining // *Int J Adv Manuf Technol.* 2017. Vol. 92. Pp. 3073–3092.

21. Ramesh R., Mannan M.A., Poo A.N. Error compensation in machine tools—a review Part II: thermal errors // *Int J Mach Tool Manuf.* 2000. Vol. 40. Is. 9. Pp. 1257–1284.

22. Yao Xd., Du Zc., Ge Gy., Yang Jg. Dynamic temperature gradient and unfalsified control approach for machine tool thermal error compensation

// *J Mech Sci Technol.* 2020. Vol. 34. Pp. 319–331.

23. Huang Z., Liu Y., Du L., Yang H. Thermal error analysis, modeling and compensation of five-axis machine tools // *J Mech Sci Technol.* 2020. Vol. 34. Pp. 4295–4305.

24. Павлов С. Системы высокопроизводительных вычислений в 2019–2020 годах: обзор достижений и анализ рынков. Часть V. Сфера PLM, включая CAE и EDA // *CAD/CAM/CAE Observer.* 2020. № 7. С. 4–19.

25. Berselli G., Bilancia P. Luzi L. Project-based learning of advanced CAD/CAE tools in engineering education // *Int J Interact Des Manuf.* 2020. Vol. 14. Pp. 1071–1083.

26. Поляков А.Н., Додоров А.И. Методика выбора твердотельных конечно-элементных моделей несущих систем станков при проведении их инженерного анализа // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова.* 2019. № 6. С. 102–116.

27. Park H., Easwaran A., Andalarn S. Challenges in Digital Twin Development for Cyber-Physical Production Systems. In: Chamberlain R., Taha W., Törngren M. (eds) *Cyber Physical Systems. Model-Based Design.* CyPhy 2018, WESE 2018. *Lecture Notes in Computer Science.* 2019. Vol. 11615.

28. Никитина И.П., Поляков А.Н. Проблемы теплоустойчивости двусторонних торцевшлифовальных станков / *Техника и технологии: пути инновационного развития: сб. научных трудов XIII Междунар. науч.-практ. конф.* // Юго-Западный государственный университет (Курск, 28 июня 2019 г.), Курск: Изд-во Юго-Западный государственный университет, 2019. С. 6-12.

29. Никитина И.П., Поляков А.Н. Экспериментальное исследование температурных и точностных характеристик двустороннего торцевшлифовального станка // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова.* 2019. № 11. С.112–120.

30. Никитина И.П., Поляков А.Н. Особенности протекания тепловых процессов в двусторонних торцевшлифовальных станках // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова.* 2021. № 1. С. 82–94.

31. Кожевникова М.Е., Ротанова Т.А., Валов А.В. Компьютерное моделирование плоских задач термоупругости: сравнительный анализ решений в связанной и несвязанной постановках // *Вычислительная механика сплошных сред.* 2017. Т. 10. № 4. С. 388–398.

Информация об авторах

Никитина Инна Петровна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов. E-mail: innanikitina@list.ru. Оренбургский государственный университет. Россия, 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13.

Поляков Александр Николаевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов, профессор. E-mail: anp_temos@mail.ru. Оренбургский государственный университет. Россия, 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13.

Воронин Дмитрий Геннадьевич, аспирант кафедры технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов. E-mail: dvoronin@zbo.ru. Оренбургский государственный университет. Россия, 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13.

Поступила 08.11.2021 г.

© Никитина И.П., Поляков А.Н., Воронин Д.Г., 2022

**Nikitina I.P., Polyakov A.N., Voronin D.G.*

Orenburg state University

**E-mail: innanikitina@list.ru*

SIMULATION OF THE THERMAL DEFORMATION BEHAVIOR OF DOUBLE SIDED FACE GRINDERS

Abstract. *The paper presents the result of modeling the thermal deformation behavior of the bearing system of a double-sided face grinder. Two modes of its operation is considered: idling and working strokes. Spindle bearings, heat fluxes from coolant, and heat fluxes from motors are considered as the main heat sources. The preliminary values of heat and convective fluxes are assigned according to well-known methods used in engineering calculations of machine tools. Refinement of the values of heat and convective fluxes is carried out according to the results of experimental values of temperatures and temperature displacements. In the thermal model, convective heat transfer is assigned to 450 surfaces. Heat flows are assigned to 161 surfaces. The simulation is run in Ansys for 6 hours of machine tool operation. Ansys uses a ten-node Solid227 element as a typical finite element. The problem of thermoelasticity is solved in a related setting. The error in modeling thermal processes did not exceed 0,5 degree, the error in modeling temperature displacements did not exceed 5 microns. The results of computer simulation confirmed the relative experimental positions of the left and right grinding wheels characteristic of this range of machines. At idle, the relative position of the grinding wheels represented the state «wider at the bottom», and during the working stroke, the state «at the bottom narrower» is recorded. The illustrations of the FEM model and contour plots for the temperature field and temperature displacements of the bearing system of the machine tool for two modes of its operation are presented.*

Keywords: *face grinding machines, temperature deformations, heat resistance, accuracy improvement, techniques.*

REFERENCES

1. Polyakov A.N. Computer research of thermal deformations of metal-cutting machines. Methods, models and algorithms [Komp'yuternye issledovaniya teplovyh deformacij metallovezhushchih stankov. Metody, modeli i algoritmy]. – Orenburg: GOU OGU, 2003. 382 p. (rus)
2. Ito Y. Thermal Deformation in Machine Tools. McGraw Hill Professional. 2010. 240 p.
3. Mayr J., Jedrzejewski J., Uhlmann E., Alkan Donmez M., Knapp W., Härtig F., Wendt K., Moriwaki T., Shore P., Schmitt R., Brecher C., Würz T., Wegener K. Thermal issues in machine tools. CIRP Ann Manuf Technol. 2012. Vol. 61. Is. 2. Pp. 771–791.
4. Kuznecov A.P. Thermal behavior and precision of machine tools [Teplovoe povedenie i tochnost' metallovezhushchih stankov]. M.: MGUTU «Stankin», YAnus-K, 2011. 255 p. (rus)
5. Bryan J. International status of thermal error research. CIRP Ann Manuf Technol. 1990. Vol. 39. Is. 2. Pp. 645–656.
6. Kuznecov A.P. Thermal conditions of metal-cutting machines [Teplovoj rezhim metallovezhushchih stankov]. M.: MGUTU «Stankin», YAnus-K, 2013. 480 p. (rus)
7. Kuznecov A.P. Thermal processes in metal cutting machines [Teplovye processy v metallovezhushchih stankah]. M.: Tekhnosfera, 2019. 488 p. (rus)
8. Bushuev V.V., Kuznetsov A.P., Khomyakov V.S., Molodtsov V.V. Precision and Efficiency of

Metal-Cutting Machines. Russian Engineering Research. 2016. Vol. 36. Is. 9. Pp. 762–773.

9. Bushuev V.V., Kuznetsov A.P., Sabirov F.S., Khomyakov V.S., Molodtsov V.V. Trends in Research on Metal-Cutting Machines. Russian Engineering Research. 2016. Vol. 36. Is. 6. Pp. 488–495.

10. Fu G., Tao C., Xie Y., Lu C., Gao H. Temperature-sensitive point selection for thermal error modeling of machine tool spindle by considering heat source regions. Int J Adv Manuf Technol. 2021. Vol. 112. Pp. 2447–2460.

11. Fan J., Wang P., Tao H., Pan R. A thermal deformation prediction method for grinding machine' spindle. Int J Adv Manuf Technol. 2021. Vol. 75.

12. Naumann A., Ruprecht D., Wensch, J. Toward transient finite element simulation of thermal deformation of machine tools in real-time. Comput Mech. 2018. Vol. 62. Pp. 929–942.

13. Ge Z., Ding X. Thermal error control method based on thermal deformation balance principle for the precision parts of machine tools. Int J Adv Manuf Technol. 2018. Vol. 97. Pp. 1253–1268.

14. Fang B., Gu T., Ye D., Luo T. An improved thermo-mechanical model for vertical machining center. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2016. Vol. 87. Pp. 2581–2592.

15. Polyakov A.N., Goncharov A.N. Reducing the temperature error of CNC machines based on the motion control of their working bodies [Snizhenie temperaturnoj pogreshnosti stankov s CHPU na osnove upravleniya dvizheniem ih rabochih organov]. – Saratov: Vuzovskoe obrazovanie, 2019. 199 p. (rus)

16. Li Y., Zhao W., Lan S., Ni J., Wu W., Lu B. A review on spindle thermal error compensation in machine tools. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2015. Vol. 95. Pp. 20–38.

17. Liu S., Lin M. Thermal–Mechanical Coupling Analysis and Experimental Study on CNC Machine Tool Feed. Mechanism. Int. J. Precis. Eng. Manuf. 2019. Vol. 20. Pp. 993–1006.

18. Zhang T., Ye W., Liang R., Lou P., Yang X. Temperature variable optimization for precision machine tool thermal error compensation on optimal threshold. Chin. J. Mech. Eng. 2013. Vol. 26. Pp. 158–165.

19. Cao H., Zhu L., Li X., Chen P., Chen Y. Thermal error compensation of dry hobbing machine tool considering workpiece thermal deformation. Int J Adv Manuf Technol. 2016. Vol. 86. Pp. 1739–1751.

20. Li T., Li F., Jiang Y., Wang H. Thermal error modeling and compensation of a heavy gantry-type machine tool and its verification in machining. Int J Adv Manuf Technol. 2017. Vol. 92. Pp. 3073–3092.

21. Ramesh R., Mannan M.A., Poo A.N. Error compensation in machine tools – a review Part II: thermal errors. Int J Mach Tool Manuf. 2000. Vol. 40. Is. 9. Pp. 1257–1284.

22. Yao Xd., Du Zc., Ge Gy., Yang Jg. Dynamic temperature gradient and unfalsified control approach for machine tool thermal error compensation. J Mech Sci Technol. 2020. Vol. 34. Pp. 319–331.

23. Huang Z., Liu Y., Du L., Yang H. Thermal error analysis, modeling and compensation of five-axis machine tools. J Mech Sci Technol. 2020. Vol. 34. Pp. 4295–4305.

24. Pavlov S. High performance computing systems in 2019–2020: an overview of achievements and market analysis. Part V. Scope of PLM, including CAE and EDA [Sistemy vysokoproizvoditel'nyh vychislenij v 2019–2020 godah: obzor dostizhenij i analiz rynkov. CHast' V. Sfera PLM, vkluchaya CAE i EDA]. CAD/CAM/CAE Observer. 2020. No. 7. Pp. 4–19.

25. Berselli G., Bilancia P. Luzzi L. Project-based learning of advanced CAD/CAE tools in engineering education. Int J Interact Des Manuf. 2020. Vol. 14. Pp. 1071–1083.

26. Polyakov A.N., Dodorov A.I. Methodology for selecting solid finite element models of machine tool bearing systems during their engineering analysis [Metodika vybora tverdotel'nyh konechno-elementnyh modelej nesushchih sistem stankov pri provedenii ih inzhenerenogo analiza]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 6. Pp. 102–116.

27. Park H., Easwaran A., Andalarn S. Challenges in Digital Twin Development for Cyber-Physical Production Systems. In: Chamberlain R., Taha W., Törngren M. (eds) Cyber Physical Systems. Model-Based Design. CyPhy 2018, WESE 2018. Lecture Notes in Computer Science. 2019. Vol. 11615.

28. Nikitina I.P., Polyakov A.N. Problems of heat resistance of bilateral face grinding machines [Problemy teploustojchivosti dvustoronnih torceshlifoval'nyh stankov]. XIII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya «Tekhnika i tekhnologii: puti innovacionnogo razvitiya». YUgo-Zapadnyj gosudarstvennyj universitet. 2019. Pp. 6–12. (rus)

29. Nikitina I.P., Polyakov A.N. Experimental investigation of the temperature and accuracy characteristics of a bilateral face grinding machine [Eksperimental'noe issledovanie temperaturnyh i tochnostnyh harakteristik dvustoronnego torceshlifoval'nogo stanka]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 11. Pp. 112–120. (rus)

30. Nikitina I.P., Polyakov A.N. Features of the

flow of thermal processes in double-sided face grinding machines [Osobennosti prottekaniya teplovykh processov v dvustoronnih torceshlifoval'nyh stankah]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 1. Pp. 82–94. (rus)

31. Kozhevnikova M.E., Rotanova T.A., Valov A.V. Computer modeling of plane thermoelasticity

problems: comparative analysis of solutions in problems and unrelated formulations [Komp'yuternoe modelirovanie ploskih zadach termouprugosti: sravnitel'nyj analiz reshenij v svyazanno i nesvyazanno postavkakh]. Vychislitel'naya mekhanika sploshnyh sred. 2017. Vol. 10. No. 4. Pp. 388–398. (rus)

Information about the authors

Nikitina, Inna P. PhD, Assistant professor. E-mail: innanikitina@list.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, av. Pobedy, 13.

Polyakov, Aleksandr N. DSc, Professor. E-mail: anp_temos@mail.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, av. Pobedy, 13.

Voronin, Dmitriy G. Postgraduate student. E-mail: dvoronin@zbo.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, av. Pobedy, 13.

Received 08.11.2021

Для цитирования:

Никитина И.П., Поляков А.Н., Воронин Д.Г. Симуляция термодформационного поведения двусторонних торцешлифовальных станков // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 1. С. 90–101. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-90-101

For citation:

Nikitina I.P., Polyakov A.N., Voronin D.G. Simulation of the thermal deformation behavior of double sided face grinders. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 1. Pp. 90–101. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-90-101

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-102-111

Шрубченко И.В., Хуртасенко А.В., Воронкова М.Н.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова**E-mail: ivshrub@yandex.ru*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМОЖНЫХ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ БАНДАЖЕЙ НА СПЕЦИАЛЬНОМ СТЕНДЕ

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы механической обработки поверхностей составных бандажей, после их сварки непосредственно на месте сборки и последующей эксплуатации, с применением мобильных технологий. Приведена конструкция устройства, включающая элементы конструкции опоры вращающейся печи, с двумя опорными роликами, привод вращения и специальный переносной станок. Установлены отличительные особенности для данной схемы механической обработки. Для обеспечения возможности осуществления процесса резания, привод вращения бандажа предложено осуществлять при помощи силы трения, от одного из опорных роликов, используя двигатель постоянного тока с бесступенчатым регулированием скорости вращения и понижающим редуктором. Предложена методика поиска рациональных режимов работы установки с использованием линейного программирования. Определены необходимые технические ограничения на режим работы установки, включающие: мощность привода вращения, тангенциальную и осевую составляющие силы резания. Установлены факторы, позволяющие варьировать процесс обработки: скорость вращения бандажа и размер снимаемого за один рабочий ход припуска. Выбраны зависимости, позволяющие установить связь варьируемых параметров с вводимыми техническими ограничениями. На их основе получена система линейных уравнений, при решении которой можно получить область значений технологических режимов, позволяющих осуществлять процесс механической обработки поверхностей бандажей на предложенной установке. Для бандажа с диаметром 6100 мм, получены рациональные технологические режимы, позволяющие осуществлять процесс восстановительной обработки поверхностей бандажей после их сварки, непосредственно на месте их последующей эксплуатации.

Ключевые слова: бандаж вращающейся печи, восстановительная обработка

Введение. В различных отраслях промышленности, таких как: металлургическая, химическая, строительных материалов и др. применяют достаточно крупные агрегаты, которые представляют собой вращающиеся технологические барабаны. Это печи для обжига цементного клинкера и извести, для сушки различных видов сырья и т.п. [1–6]. Такая установка обычно содержит стальной корпус, футеруемый изнутри огнеупорным материалом, который имеет от двух и более опор качения, содержащих бандажи, каждый из которых опирается на два опорных ролика. Диапазон типоразмеров таких агрегатов достаточно широк и может достигать 230 м. в длину и до 7 м в диаметре. Такие технологические машины работают обычно по непрерывному циклу и не допускают даже кратковременных остановов в работе. Состояние опор технологических барабанов и особенно их поверхностей качения, во многом определяют нормальную работоспособность всего агрегата. Поэтому поддержанию точности формы поверхностей качения опор уделяют особое внимание [6–9]. Отечественной промышленностью выпускаются несколько типов бандажей [10, 11]. Это бандажи плавающего типа, которые устанавливают на корпус печи с зазором, и в процессе работы они могут осуществлять относительно корпуса определенные перемещения.

Бандажи вварного типа, жестко соединяют с корпусом печи, при помощи сварки. На рис. 1 представлены конструкция и размеры бандажей типа П, исполнение – 1, которые изготавливают в соответствии с ОСТ 22-170-87, а их основные параметры в таблице 1. В соответствии с данным отраслевым стандартом, к бандажам предъявляют ряд требований, как по точности размеров, так и формы, и взаимного расположения поверхностей:

- размеры поверхностей выполняют с полем допуска по H12;
- диаметральный размер посадочной поверхности – по H8.
- поверхности качения должны иметь шероховатость – (6,3...12,5) Ra;
- превышение сварного шва над поверхностью качения – в пределах 1 мм;
- точность взаимного расположения поверхности качения и посадочного отверстия – в пределах допусков на размеры этих поверхностей;
- погрешность формы поверхности качения: при диаметре до 4000 мм – в пределах 2 мм; при диаметре более 4000 мм до 5500 мм – в пределах 2,5 мм; при диаметре более 5500 мм до 6100 мм – в пределах 3 мм; при диаметре более 6100 мм – в пределах 3,5 мм.

Следует отметить, что при изготовлении бандажей на предприятии-изготовителе, такие параметры точности обеспечить не представляет никакого труда. Вместе с тем, детали, имеющие

диаметральные размеры более 4500 мм, транспортировать к месту окончательной сборки и последующей эксплуатации, оказывается невозможно.

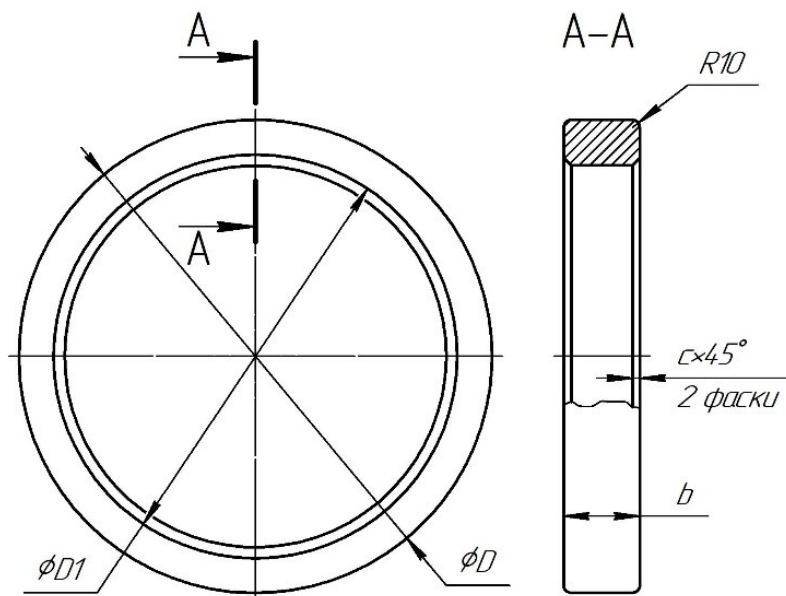


Рис. 1. Типоразмера бандажей плавающего типа, исполнение – 1 по ОСТ 22-170-87

Таблица 1

Параметры бандажей плавающего типа (тип «П»), исполнение 1

№	Диаметр корпуса печи	D	D1	b	c	Масса, кг (не более)
	2500	3100	2644	500	5	8100
	3000	3700	3144	550	5	12900
	3300	3900	3452	550	5	11120
	3600	4300	3764	700	5	18200
	3600	4310	3764	600	5	16300
	4000	4850	4184	800	5	29700
	4500	5470	4760	900	5	40400
	5000	6100	5300	1000	10	56200
	5000	6250	5360	1100	10	70700
	5600	6800	5960	1000	10	66300
	5600	6800	5960	1200	10	79600
	6400	7750	6800	1200	10	102800
	7000	8450	7450	1350	10	132400

Поэтому, бандажи, вращающихся печей, с диаметром более 4500 мм, на предприятии изготовителе по завершению изготовления, разрезают на два полукольца (рис. 2). Это позволяет обеспечить их транспортировку к месту их последующей сборки и эксплуатации.

Для последующего монтажа бандажа, оба его полукольца непосредственно на месте последующей эксплуатации соединяют сваркой (рис. 3). Для этого на специальной площадке с бетонированным основанием, размещают регулируемые опоры, на которые устанавливают полукольца бандажа для последующего их соединения. Выполняют регулирование их взаимного

расположения, далее предварительный нагрев зоны будущего сварного шва и затем уже сварку. Такой процесс сборки обычно выполняют специализированные предприятия, но применяемые при этом оборудование и технологии, не позволяют получить требуемой точности. Следует так же отметить, что для измерения формы таких крупногабаритных поверхностей, так же отсутствуют и надлежащие средства контроля. Возможные погрешности формы, образующиеся при такой сборке, обычно устраняют ручными шлифовальными машинами.



Рис. 2. Часть бандажа, подготовленная к транспортированию [Щетинин Н. А. Процесс и оборудование для реконструкции бандажей вращающихся печей: диссертация ... кандидата технических наук: 05.02.13; [Место защиты: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова]. Белгород, 2014. 204 с.]



Рис. 3. Сборка полуколец бандажа [Щетинин Н. А. Процесс и оборудование для реконструкции бандажей вращающихся печей: диссертация ... кандидата технических наук: 05.02.13; [Место защиты: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Белгород, 2014. 204 с.]

После сварки бандажа, погрешность его посадочной поверхности и поверхности качения, существенно превышает допуска, предусмотренные ОСТ 22 -170 -87. Очевидно, что последующая эксплуатация бандажа с такой погрешностью поверхностей, будет приводить к возрастанию циклической нагрузки на опору печи и ее корпус, а также колебанию нагрузки на приводе. Обычно в зоне таких опор наблюдается частый выход из строя футеровки печи, что приводит к внеплановым остановам в ее работе. Для восстановления требуемой точности поверхностей,

предложена схема обработка, имитирующая опору вращающейся печи, включающую раму, с двумя опорными роликами и оснащаемую переносным станком [12] (рис. 4).

Для снижения затрат на монтаж такой установки, применена типовая рама опоры вращающейся печи, с опорными роликами, один из которых имеет привод вращения цепной передачей от понижающего редуктора и двигателя постоянного тока. Конструкция оснащается системой предохранительных роликов, ограничивающих

возможные осевые смещения бандажа. Для осуществления процесса съема припуска, применена конструкция специального переносного станка (рис. 5). В качестве основного базирующего элемента, использован силовой стол, который достаточно часто применяют в различных агрегатных станках. Этот стол имеет привод рабочих и ускоренных продольных перемещений. Возможность изменения величины рабочей подачи обеспечивается за счет сменных зубчатых

колес, которые устанавливают в коробке скоростей. На верхней плоскости платформы стола, установлена вертикальная стойка, несущая поперечный суппорт. Конструкция поперечного суппорта, оснащена подключаемым приводом механической подачи. Для обеспечения повышенной жесткости резцедержатель выполнен не поворотным, но с тремя позициями для возможной установки обрабатывающего инструмента.



Рис. 4. Установка для исправления формы поверхностей бандажа [Щетинин Н. А. Процесс и оборудование для реконструкции бандажей вращающихся печей: диссертация ... кандидата технических наук: 05.02.13; [Место защиты: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Белгород, 2014. 204 с.]

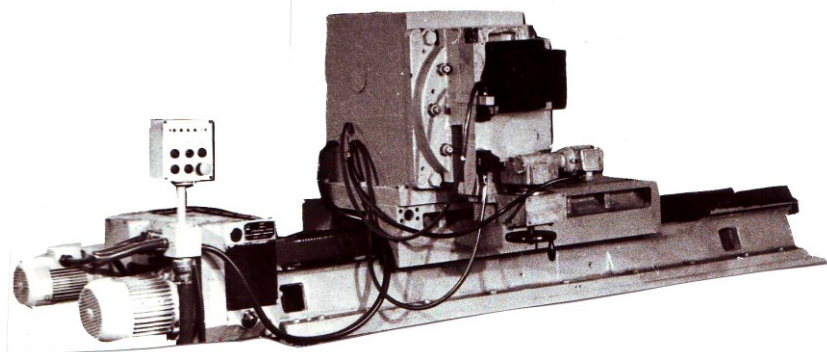


Рис. 5. Специальный переносной станок [Щетинин Н. А. Процесс и оборудование для реконструкции бандажей вращающихся печей: диссертация ... кандидата технических наук: 05.02.13; [Место защиты: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Белгород, 2014. 204 с.]

Следует отметить, что такая схема обработки бандажа имеет бесцентровую схему [13] и для нее есть ряд существенных отличий по сравнению с мобильной технологией обработки непосредственно на работающей печи [14, 15, 16]. Эти отличия заключаются в следующем:

- вращение бандажу передается за счет

силы трения, между поверхностями качения бандажа и приводного опорного ролика;

- изменения скорости вращения бандажа выполняется бесступенчато, в расширенном диапазоне 0...2,14 об/мин.;

- масса обрабатываемого изделия, базирующегося на опорные ролики существенно меньше, что окажет влияние на величину силы

трения.

Материалы и методы. Для обеспечения требуемых технологических условий обработки таких деталей как бандаж вращающихся печей, в частности при разработке новых технологических способов или совершенствования существующих возникает необходимость применения математического моделирования [17, 18, 19].

Следует отметить, что стабильное вращение обрабатываемого бандаж будет возможно, если сила трения в паре бандаж-приводной ролик, будет превышать тангенциальную составляющую силы резания. Если такое условие не будет обеспечено, то возможна внезапная остановка обрабатываемого бандаж. А это в свою очередь выведет из строя обрабатывающий инструмент.

Чтобы исключить такую возможность, необходимо оптимизировать режимы работы стандового устройства. Для этих условий удобно применить метод линейного программирования [18]. Чтобы обеспечить стабильность вращения обрабатываемого бандаж, необходимо выполнения ряда условий:

- мощность привода вращения должна превышать мощность резания;
- тангенциальная сила трения в паре бандаж-приводной ролик должна превышать тангенциальную составляющую силы резания P_z ;
- осевая сила трения в паре бандаж-опорные ролики должна превышать осевую составляющую силы резания P_x .

Основная часть. Известно, что на величину силы резания оказывают влияние такие факторы как: скорость резания, подача, глубина резания [19, 20], а также геометрия обрабатывающего инструмента. Следует отметить, что геометрические параметры обрабатывающего инструмента, а также величина подачи, будут оказывать влияние и на шероховатость обрабатываемой поверхности. Поэтому их варьирование не приемлемо для заданных условий обработки. Таким образом, допустимыми для варьирования оказываются скорость вращения обрабатываемого изделия и величина снимаемого припуска.

Ищем зависимости, которые содержат связь вышеприведенных технических ограничений и установленных параметров процесса для варьирования:

- Вращение обрабатываемого бандаж будет возможно, если мощность привода вращения будет больше мощности резания, т.е.:

$$N_{рез} < N_{привода} \quad (1)$$

Мощность резания можно определить по известной зависимости:

$$N_{рез} = \frac{P_z \cdot V \cdot K}{1020 \cdot 60}, \quad (2)$$

где P_z – тангенциальная составляющая силы резания, определяемая как:

$$P_z = 10 \cdot C_p \cdot t^{x_z} \cdot s^{y_z} \cdot V^{n_z} \cdot k_p \quad (3)$$

Скорость резания, она же скорость вращения бандаж:

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (4)$$

где C_p , k_p , x_z , y_z , n_z – постоянная, коэффициенты и показатели степеней, зависящие от условий обработки; V – скорость вращения; K – коэффициент запаса; N – частота вращения.

Таким образом, получаем следующее техническое ограничение, преобразованное к линейному виду:

$$x_z \cdot \ln(t) + (n_z + 1) \cdot \ln(n) < \ln \left(\frac{N_{привода} \cdot 1000^{n_z+1} \cdot 1020 \cdot 60}{10 \cdot C_p \cdot s^{y_z} \cdot k_p \cdot (\pi \cdot D)^{n_z+1} \cdot K} \right) \quad (5)$$

Принимаем: $\ln(t) = x_1$; $\ln(n) = x_2$;

$$\ln \left(\frac{N_{привода} \cdot 1000^{n_z+1} \cdot 1020 \cdot 60}{10 \cdot C_p \cdot s^{y_z} \cdot k_p \cdot (\pi \cdot D)^{n_z+1} \cdot K} \right) = b_1. \text{ В результате}$$

замены ограничение по допустимой составляющей силы резания, определяющей тяговую силу, развиваемую приводом вращения бандаж на специальном устройстве, принимает вид:

$$x_z \cdot x_1 + (n_z + 1) \cdot x_2 < b_1 \quad (6)$$

- тангенциальная сила трения в паре бандаж-приводной ролик должна превышать тангенциальную составляющую силы резания P_z . Это условие позволит исключить возможную остановку вращения бандаж за счет действия тангенциальной составляющей силы резания. Таким образом, устанавливаем связь между этой составляющей силы резания P_z и силой трения F_f , в паре бандаж-приводной ролик (рис. 6).

Возможность вращения бандаж можем описать следующей зависимостью:

$$k \cdot F_t = F_f = f \cdot F_n \quad (7)$$

где k – коэффициент запаса; f – коэффициент трения пары бандаж-ролик; $F_n = M \cdot 4,9 \cdot \cos 30^\circ$, M – масса устанавливаемого для обработки бандаж.

Чтобы обеспечить вращение без проскальзывания должно выполняться условие:

$$P_z < F_t \quad (8)$$

$$P_z < \frac{f \cdot F_n}{k} \quad (9)$$

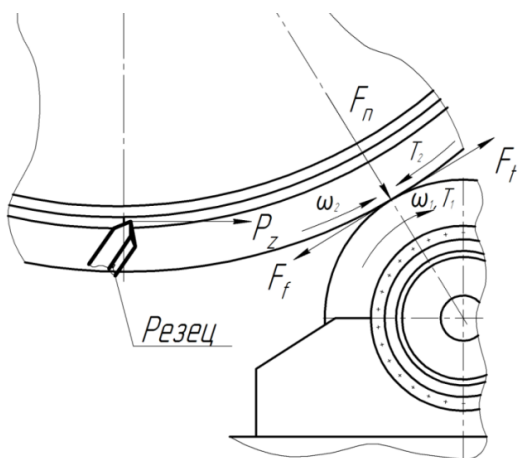


Рис. 6. К определению возможности вращения бандажа

Подставляя полученные формулы в неравенство и, производя некоторые математические преобразования, получаем:

$$x_z \cdot \ln(t) + n_z \cdot \ln(n) < \ln \left(\frac{1000^{n_z} \cdot F_n \cdot f}{10 \cdot (\pi D)^{n_z} \cdot C_p \cdot s^{y_z} \cdot k_p \cdot k} \right) \quad (10)$$

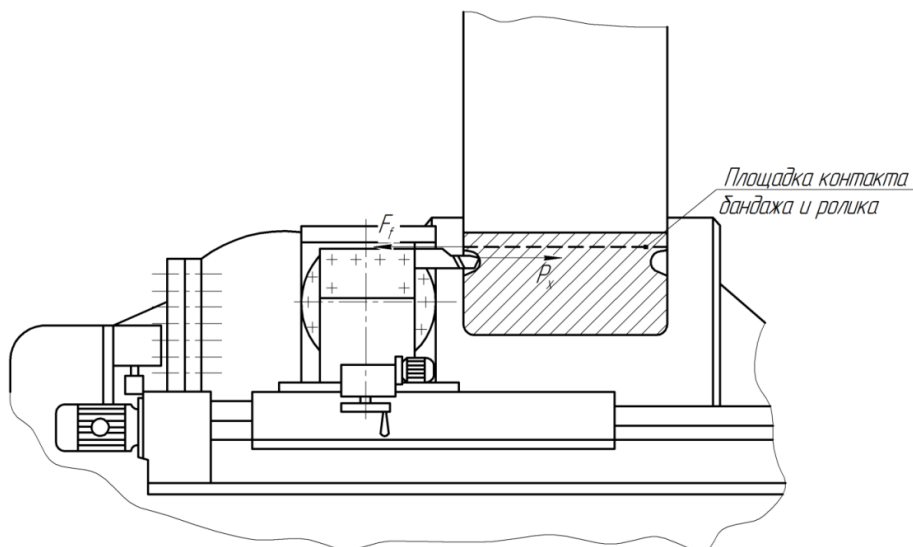


Рис. 7. К определению возможных осевых смещений бандажа

Подставляя полученные зависимости в неравенство и, производя соответствующие математические преобразования, получаем:

$$x_x \cdot \ln(t) + n_x \cdot \ln(n) < \ln \left(\frac{1000^{n_x} \cdot F_n \cdot f \cdot 2}{10 \cdot (\pi \cdot D)^{n_x} \cdot C_p \cdot s^{y_x} \cdot k_p} \right) \quad (15)$$

$$x_x \cdot x_1 + n_x \cdot x_2 < b_3$$

С учетом всех выполненных изысканий, математическая модель для определения граничных условий по режимам обработки, будет иметь

Производя замену аналогично предыдущему пункту, получаем техническое ограничение в следующем виде:

$$x_z \cdot x_1 + n_x \cdot x_2 < b_2 \quad (11)$$

– третьим ограничением устанавливаем связь между осевой составляющей силы резания P_x и силой трения F_f , в осевом направлении (рис. 7). Таким образом, осевые смещения бандажа по поверхностям роликов, будут исключены, если будет выполняться условие:

$$P_x < F_f, \quad (12)$$

где P_x – осевая составляющая силы резания, которую можем определить по следующей зависимости:

$$P_x = 10 \cdot C_p \cdot t^{x_x} \cdot s^{y_x} \cdot V^{n_x} \cdot k_p, \quad (13)$$

где C_p , k_p , x_x , y_x , n_x – постоянная, коэффициенты и показатели степеней, выбираемые для данной схемы обработки; F_f – сила трения в осевом направлении.

$$F_f = 2 \cdot f \cdot F_n \quad (14)$$

где f – коэффициент трения в паре бандаж-ролик; $F_n = M \cdot 4,9 \cdot \cos 30^\circ$, M – масса бандажа.

вид:

$$\begin{aligned} x_z \cdot x_1 + (n_z + 1) \cdot x_2 &< b_1 \\ x_z \cdot x_1 + n_z \cdot x_2 &< b_2 \\ x_x \cdot x_1 + n_x \cdot x_2 &< b_3 \\ f_o &= (x_1 + x_2)_{\max} \end{aligned} \quad (16)$$

Для определения рациональных параметров процесса, которые позволят осуществлять обработку бандажа, необходимо найти значения варьируемых параметров как:

$$t_{onm} = e^{x_{1onm}} \quad (17)$$

$$n_{onm} = e^{x_{2onm}} \quad (18)$$

$$x_{1onm} = \ln(t) = 1,0399 \rightarrow t_{onm} = 3 \text{ мм} \quad (19)$$

$$x_{2onm} = \ln(n) = 0,015 \rightarrow n_{onm} = 1,015 \text{ об/мин} \quad (20)$$

Для наглядности, выше приведенную математическую модель (16) можем представить и в графическом виде, где каждое из вводимых технических ограничений, представляем соответствующей прямой. Нанесение этих прямых позволит определить полуплоскость, где значения варьируемых параметров будут удовлетворять условию решения данной системы. В данной области будет иметь геометрическое место точек со значениями варьируемых параметров, позволяющих осуществлять процесс обработки бандажа.

В результате решения системы уравнений в приложении *Mathcad*, были получены предельные значения варьируемых параметров для бандажа с диаметром 6100 мм с заданными геометрическими и физико-механическими характеристиками [10]. Такими параметрами в данном случае являются технологические режимы обработки – глубина резания и частота вращения детали:

Для более глубокого и всестороннего исследования данной схемы восстановительной обработки потребуется ввести еще ряд ограничений на варьируемые параметры, чтобы обеспечить также требования по точности и шероховатости обработки. Учитывая то, что в данной схеме применена бесцентровая обработка, то следует ввести ограничения на глубину снимаемого за один проход припуска. Ряд проведенных ранее исследований [21], позволил получить диаграммы зависимости точности формы от величины припуска, снимаемого за один рабочий ход (рис. 8). Анализ данной диаграммы позволяет отыскать такие предельные значения припуска (минимального и максимального), при съеме которого будет осуществляться исправление формы обрабатываемой поверхности.

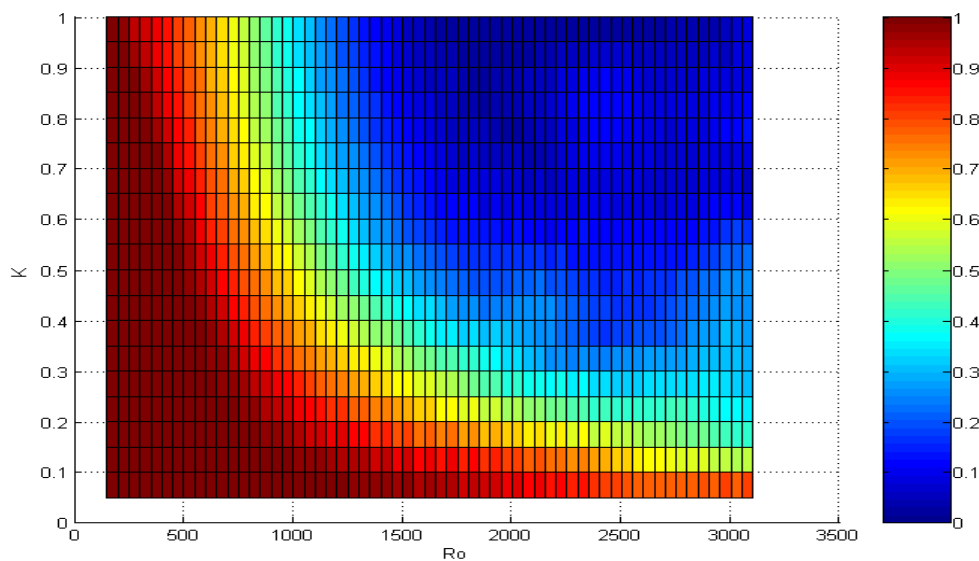


Рис. 8. Диаграмма зависимости точности обработки от величины снимаемого припуска

Качество обработки поверхности при ее механической обработке определяется и получаемой величиной шероховатости. Поэтому можно ввести еще и ограничение по требуемой шероховатости обрабатываемой поверхности. Это ограничение устанавливает взаимосвязь между варьируемыми параметрами и шероховатостью поверхности.

Выводы. Применение математического моделирования на основе предложенного подхода позволило определить оптимальные условия обработки на специальном стенде детали с заданными геометрическими параметрами и физико-механическими свойствами. В модели учтены

условия бесцентрового базирования детали на двух роликах с боковой поддержкой. Проведенные исследования определяют необходимость использования математического моделирования в случаях изменения параметров стенда, таких как диаметры опорных роликов, межосевое расстояние между ними. Следует рекомендовать проведение дальнейших исследований в направлении оптимизации параметров стенда для установленного диапазона типоразмеров обрабатываемых деталей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Vijayan S.N., Sendhilkumar S. Industrial Applications of Rotary Kiln in Various Sectors - A Review. *International Journal of Engineering Innovation & Research*. 2014. Vol. 3. Pp. 342–345.
2. Boaten A.A. *Rotary Kilns*. Elsevier Inc. Publ., 2015. 390 p.
3. Ramanenka D., Stjernberg J., Jonsén P. FEM investigation of global mechanisms affecting brick lining stability in a rotary kiln in cold state. *Engineering Failure Analysis*. 2016. Vol. 59. Pp. 554–569.
4. Design features of rotary kilns. [Электронный ресурс]. URL: https://www.cementkilns.co.uk/kiln_design.html. (дата обращения: 09.11.2021)
5. Comprehensive Kiln Alignment. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.anioncorp.com/technical-papers/world-cement-article.pdf> (дата обращения: 08.12.2021)
6. Phillips Kiln Services. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pkse.co.uk/services/resurfacing.php> (дата обращения: 05.11.2021)
7. Mogilny S., Sholomitskii A. Precision Analysis of Geometric Parameters for Rotating Machines during Cold Alignment. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 206. Pp. 1709–1715.
8. Росс Дж. К вопросам о выверке и техническом обслуживании вращающихся печей // Цемент и его применение. 2020. №5. С. 68–71. [Электронный ресурс]. URL: <https://jcement.ru/reading/cemchem/k-voprosam-o-vyverke-i-tekhnicheskom-obsluzhivanii-vrashchayushchikhsya-pechey/> (дата обращения: 05.12.2021)
9. ООО «МосХимЦемСервис»: технологическое обслуживание и восстановление промышленного оборудования. [Электронный ресурс]. URL: http://moshimtsemservis.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=1:okompanii&catid=2 (дата обращения: 12.11.2021)
10. Бандажи для промышленных печей. [Электронный ресурс]. URL: <https://tulpech.ru/bandazhi-dlya-promyshlennyh-pechej> (дата обращения: 05.12.2021)
11. Бандажи плавающие и бандажи вварные. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.npp-prom.com/zapasnye-chasti-pechej-vrashayushih> (дата обращения: 05.12.2021)
12. Шрубченко И.В., Мурыгина Л.В., Щетинин Н.А. Технологический процесс реконструкции бандажей типа «П» в тип «В» // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. № 1. С. 73–77.
13. Захаров О.В. Управление точностью бесцентрового шлифования статистическими методами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 9. С. 32–35.
14. Пелипенко Н.А., Санин С.Н. Определение положения измерительной базы при базировании и вращении эллиптического бандажа // Тяжелое машиностроение. 2014. № 1. С. 32–36.
15. Дуганов В.Я. Определение передаточных отношений и коэффициента исправления формы деформированного кольца цементных печей при его бесцентровой обработке // Ремонт, восстановление, модернизация. 2013. №9. С. 47.
16. Гончаров М.С., Хуртасенко А.В., Шрубченко И.В. Особенности формообразования при восстановительной обработке бандажей переносными станками // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 7. С. 10–25. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-7-10-25
17. Хуртасенко В.А., Шрубченко И.В. Математическая модель для оптимизации параметров обработки поверхностей качения технологических агрегатов мобильным оборудованием // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 4. С. 144–149. DOI: <https://doi.org/10.12737/issn.2071-7318>
18. Пелипенко Н.А., Санин С.Н. Описание поведения центра бандажа с помощью математического моделирования // Ремонт, восстановление, модернизация. 2013. № 1. С. 46–48.
19. Шрубченко И.В., Мурыгина Л.В., Рыбалко В.Ю., Щетинин Н.А. Оптимизация режимов обработки бандажей на специальном стенде // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. № 4. С. 67–73.
20. Shrubchenko I.V., Hurtasenko A.V., Voronkova M.N., Murygina L.V. Optimization of Cutting Conditions for the Processing of Bandages of Rotary Cement Kilns at a Special Stand // *World Applied Sciences Journal*. 2014. № 31 (9). Pp. 1593–1600. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2014.31.09.14481

Информация об авторах

Шрубченко Иван Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения. E-mail: ivshrub@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Хуртасенко Андрей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения. E-mail: hurtintbel@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Воронкова Марина Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения.
E-mail: mkuzko@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия,
308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 10.12.2021 г.

© Шрубченко И.В., Хуртасенко А.В., Воронкова М.Н., 2022

**Shrubchenko I.V., Khurtasenko A.V., Voronkova M.N.
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
E-mail: ivshrub@yandex.ru

DETERMINATION OF POSSIBLE PROCESSING MODES OF THE SURFACES OF THE BANDAGES ON A SPECIAL STAND

Abstract. The article deals with the issues of machining the surfaces of composite bandages, after welding them directly at the assembly site and subsequent operation, using mobile technologies. The design of the device is presented. It includes structural elements of the support of a rotary kiln, with two support rollers, a rotation drive and a special portable machine. Distinctive features for this machining scheme have been established. To enable the cutting process, it is proposed to drive the rim rotation using friction force from one of the support rollers, using a DC motor with a stepless rotation speed control and a reduction gear. A method of searching for rational operating modes of the installation using linear programming is proposed. The necessary technical restrictions on the operating mode of the installation have been determined. They are the power of the rotation drive, the tangential and axial components of the cutting force. The rotation speed of the band and the size of the allowance removed in one working stroke allow varying the treatment process. Selected dependencies allow to establish a connection between the varied parameters and the introduced technical constraints. The system of linear equations is obtained on their basis, by solving which it is possible to obtain the range of values of technological modes that allow the process of machining the surfaces of bandages on the proposed installation. For a bandages with a diameter of 6100 mm, rational technological modes have been obtained that allow the process of restorative treatment of the surfaces of the bandages after welding, directly at the site of their subsequent operation.

Keywords: rotary kiln bandage, restorative treatment

REFERENCES

1. Vijayan S.N., Sendhilkumar S. Industrial Applications of Rotary Kiln in Various Sectors - A Review. International Journal of Engineering Innovation & Research. 2014. Vol. 3. Pp. 342–345.
2. Boaten A.A. Rotary Kilns. Elsevier Inc. Publ., 2015. 390 p.
3. Ramanenka D., Stjernberg J., Jonsén P. FEM investigation of global mechanisms affecting brick lining stability in a rotary kiln in cold state. Engineering Failure Analysis. 2016. Vol. 59. Pp. 554–569.
4. Design features of rotary kilns. URL: https://www.cementkilns.co.uk/kiln_design.html. (date of treatment: 09.11.2021)
5. Comprehensive Kiln Alignment. URL: <https://www.anioncorp.com/technical-papers/world-cement-article.pdf> (date of treatment: 08.12.2021)
6. Phillips Kiln Services. URL: <http://www.pkse.co.uk/services/resurfacing.php> (date of treatment: 05.11.2021)
7. Mogilny S., Sholomitskii A. Precision Analysis of Geometric Parameters for Rotating Machines during Cold Alignment. Procedia Engineering. 2017. Vol. 206. Pp. 1709–1715.
8. Ross D. For questions about alignment and maintenance of rotary kilns [K voprosam o vyverke i tekhnicheskoy obsluzhivani vrashchayushchihsya pechej]. Cement i ego primenenie. 2020. No. 5. Pp. 68–71. URL: <https://jcement.ru/reading/cement/k-voprosam-o-vyverke-i-tekhnicheskoy-obsluzhivani-vrashchayushchikhsya-pechej/> (date of treatment: 05.12.2021) (rus)
9. LLC "MosChemCemService": technological maintenance and restoration of industrial equipment [ООО «MosKHimCemServis»: tekhnologicheskoe obsluzhivanie i vosstanovlenie promyshlennogo oborudovaniya] URL: http://moshimtsem-servis.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=1:o-kompanii&catid=2 (date of treatment: 12.11.2021) (rus)
10. Bandages for industrial furnaces [Bandazhi dlya promyshlennyh pechej]. URL: <https://tulpech.ru/bandazhi-dlya-promyshlennyh-pechej> (date of treatment: 05.12.2021) (rus)
11. Floating and welded-in bandages [Bandazhi plavayushchie i bandazhi vvarnye]. URL: <https://www.npp-prom.com/zapasnye-chasti-pechej-vrashayushih> (date of treatment: 05.12.2021) (rus)
12. Shrubchenko I.V., Murygina L.V., Shchetinin N.A. Technological process of reconstruction of

type "P" bandages into type "B"[Tekhnologicheskij process rekonstrukciibandazhejtipa «P» v tip «V»]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2014. No. 1. Pp. 73–77. (rus)

13. Zaharov O.V. Management of accuracy of centerless grinding by the statistical methods[Upravlenietochnost'yubescentrovogoshlifovaniyastatisticheskimi metodami]. Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie. 2009. No.9. Pp. 32–35. (rus)

14. Pelipenko N.A., Sanin S.N. Position determination of gage length in basing and rotating of elliptical bandage [Opredelenie polozheniya izmeritel'noj bazy pri bazirovanii i vrashchenii elliptichnogo bandazha]. Tyazheloe mashinostroenie. 2014. No. 1. Pp. 32–36. (rus)

15. Duganov V.Ya. Determination of the gear ratios and the correction factor for the shape of the deformed ring of cement kilns during its centerless processing [Opredelenie peredatochnyh otnoshenij i koefficienta ispravleniya formy deformirovannogo kol'ca cementnyh pechej pri ego bescentrovoj obrabotke]. Repair, Reconditioning, Modernization. 2013. No. 9. Pp. 47. (rus)

16. Goncharov M.S., Khurtasenko A.V., Shrubchenko I.V. Features of forming at shroud restorative machining by portable machine tools [Osobennosti formoobrazovaniya pri vosstanovitel'noj obrabotke bandazhej perenosnymi stankami]. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2017.

Vol. 21. No. 7. Pp. 10–25. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-7-10-25 (rus)

17. Khurtasenko V.A., Shrubchenko I.V. Mathematical model for optimization of processing parameters of rolling surface of technological units by mobile equipment [Matematicheskaya model' dlya optimizacii parametrov obrabotki poverhnostej kacheniya tekhnologicheskikh agregatov mobil'nyh oborudovaniem]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 4. Pp. 144–149. DOI: <https://doi.org/10.12737/issn.2071-7318> (rus)

18. Pelipenko N.A., Sanin S.N. Describing the behavior of the center of mass of a tire with mathematical modeling [Opisanie povedeniya centra bandazha s pomoshch'yu matematicheskogo modelirovaniya]. Repair, Reconditioning, Modernization. 2013. No. 1. Pp. 46–48. (rus)

19. Shrubchenko I.V., Murygina L.V., Rybalko V.Yu., Shchetinin N.A. Optimization of processing modes for bandages on a special stand [Optimizaciya rezhimov obrabotki bandazhej na special'nom stende]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov 2013. No. 4. Pp. 67–73. (rus)

20. Shrubchenko I.V., Hurtasenko A.V., Voronkova M.N., Murygina L.V. Optimization of Cutting Conditions for the Processing of Bandages of Rotary Cement Kilns at a Special Stand. World Applied Sciences Journal. 2014. № 31 (9). Pp. 1593–1600. doi: 10.5829/idosi.wasj.2014.31.09.14481

Information about the authors

Shrubchenko, Ivan V. DSc, Professor. E-mail: ivshrub@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Khurtasenko, Andrey V. PhD, Assistant professor. E-mail: hurtintbel@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Voronkova, Marina N. PhD, Assistant professor. E-mail: mkuzko@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 10.12.2021

Для цитирования:

Шрубченко И.В., Хуртасенко А.В., Воронкова М.Н. Определение возможных режимов обработки поверхностей бандажей на специальном стенде // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 1. С. 102–111. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-102-111

For citation:

Shrubchenko I.V., Khurtasenko A.V., Voronkova M.N. Determination of possible processing modes of the surfaces of the bandages on a special stand. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 1. Pp. 102–111. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-102-111

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-112-120

¹Аль-Джарах Р.А., ²Осипов А.А., ^{1,*}Першин В.Ф.¹Тамбовский государственный технический университет²АО «ЗАВКОМ»

*E-mail: pershin.home@mail.ru

РАСЧЕТ РОТОРНОГО АППАРАТА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ГРАФЕНОСОДЕРЖАЩИХ СУСПЕНЗИЙ

Аннотация. В статье рассмотрен расчет роторного аппарата с подвижными лопастями для производства графеносодержащих суспензий, которые используются для модифицирования конструкционных и функциональных материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Дано обоснование целесообразности получения графеновых пластин методом сдвиговой эксфолиации графита непосредственно в жидкостях, которые входят в состав данных материалов. Проведены экспериментальные исследования процесса эксфолиации с тремя вариантами роторного аппарата. В первом варианте использовали роторный смеситель с большими сдвиговыми усилиями (*high-shear mixer*). Во втором варианте использовали роторный аппарат с подвижными лопастями. Указанные два варианта реализуют процесс эксфолиации графита в периодическом режиме. В третьем варианте использовали роторный аппарат с подвижными лопастями, работающий в непрерывном режиме. При работе в периодическом режиме суспензия попадает в роторный аппарат случайным образом, что не дает гарантии ее равномерной обработки. При непрерывном режиме суспензия подается насосом с регулируемой производительностью, что позволяет не только равномерно обрабатывать всю суспензию, но и контролировать время пребывания суспензии в зоне эксфолиации. Исследована кинетика процесса эксфолиации в неорганических и органических жидкостях. Показано, что наиболее эффективно процесс эксфолиации реализуется в непрерывном режиме. По результатам анализа, предложены зависимости для расчета основных режимных и геометрических параметров роторных аппаратов с подвижными лопастями, что позволяет проектировать аппараты с заданной производительностью.

Ключевые слова: графеновые пластины, сдвиговая эксфолиация, предельная концентрация, модификатор.

Введение. Результаты лабораторных исследований показали, что графеновые пластины целесообразно использовать в качестве модификатора, который улучшает эксплуатационные характеристики материалов: бетонов [1–4]; эпоксидных смол [5–7]; полимеров [8]; смазочных материалов [9–12]; суперконденсаторы и батареи [13, 14]. Промышленное использование графеновых пластин сдерживается отсутствием дешевых и экологически чистых технологий их производства.

Производственные технологии получения графеновых пластин включают: микрорасщепление; химическое осаждение из паровой фазы; жидкофазное расслоение; окисление-восстановление. Детальный анализ указанных технологий позволил установить, что существует компромисс между стоимостью и масштабируемостью, с одной стороны, и качеством графена, с другой. Это означает, что одни методы лучше подходят для приложений графена высокого качества с небольшими объемами (электроника, оптика), в то время как другие приложения, требуют большой производительности, но с менее жесткими требованиями к качеству. По возрастанию качества и цены, данные технологии следуют в следующей последовательности: окисление-восстановление

(Oxidisation-Reduction) – (Plasma) – жидкофазное расслоение графита (Liquid-Phase Exfoliation) – химическое осаждение из паровой фазы (CVD) – скотч метод (Scotch-Tape) [15].

Механическое отшелушивание было разработано Геймом и Новоселовым в 2004 году, и за исследование свойств графена им была присуждена Нобелевская премия в конце 2010 года. Это был основной метод, использованный для выделения одного монослоя графита. Его простой механизм основан на многократном отслаивании чрезвычайно ориентированного графита с использованием скотча. В 2005 году получили графеновые листы толщиной 10–100 нм с использованием Graphite Island, соединенного с кончиком микропроцессированного кремниевого кантилевера для сканирования по поверхности SiO₂/Si [16]. Полученные таким образом хлопья значительно различаются по размеру и толщине, а размер варьируется от нанометров до нескольких десятков микрометров для однослойного графена, в зависимости от подготовки использованной пластины. Однослойный графен имеет коэффициент поглощения 2 % и его можно увидеть под световым микроскопом на SiO₂/Si из-за интерференционных эффектов.

В методе CVD рост графена на поверхности происходит из-за термического разложения молекул углеводородного газа (пропана, ацетилена и метана), катализируемого поверхностью металла [17]. Переходные металлы широко используются в качестве катализаторов в процессе производства различных аллотропов углерода, таких как нанотрубки, поэтому неудивительно, что переходные металлы (Cu, Ni, Re, Ru, Ir, Co, Pt и Pd) являются основным объектом анализа при производстве графена. Переходные металлы весьма привлекательны для получения высококачественного графена большой площади и для разработки метода, который может быть интегрирован в существующую полупроводниковую промышленность. Основным недостатком методологии CVD является необходимость этапа, на котором графен переносится с металла на дополнительную подходящую подложку.

Восходящие маршруты химического синтеза имеют потенциал для крупномасштабного производства графена по доступной цене и могут привести к изменению гипотез в этой области. Источником углерода предпочтительно является сахар, содержащий 6-членную кольцевую структуру, хотя многие другие углеродистые материалы могут подвергаться дегидратации, пиролизу или окислению и использоваться для получения графена [18]. Это изобретение послужило толчком для крупномасштабного производства недорогого графена и, следовательно, может предоставить возможности коммерциализации для реальных приложений.

Технология получения графеновых пластин методом жидкофазной сдвиговой эксфолиацией графита является одной из наиболее перспективных для массового производства графена. Началом интенсивных научных исследований данного метода послужила работа большого коллектива английских ученых [19]. Экспериментальное подтверждение перспективности использования графеносодержащих суспензий, полученных методом жидкофазной сдвиговой эксфолиацией графита было получено на примере модифицирования бетона [20]. В исследованиях [19, 20] эксфолиацию проводили в периодическом режиме, что не может обеспечить многотоннажное производство графеновой суспензии.

Цель настоящей статьи заключается в анализе перспектив промышленного производства графеносодержащих суспензий и разработка методов расчета основных режимных и геометрических параметров роторных аппаратов непрерывного действия.

Материалы и методы. В качестве исходного материала использовали природный графит ГСМ-2, показатели качества которого представлены в табл. 1.

Материалы и методы. В качестве исходного материала использовали природный графит ГСМ-2, показатели качества которого представлены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели качества графита

№	Наименование продуктов	ТУ, ГОСТ	Показатели качества	Норма	Назначение
1	Графит ГСМ-2	ГОСТ 18191-78	Зольность, % Выход летучих, в том числе от флотореагентов, %	не более 0,5 не более 0,2	Исходный материал для эксфолиации

Процесс жидкофазной сдвиговой эксфолиации проводили тремя вариантами роторного аппарата. В первом варианте использовали роторный смеситель с большими сдвиговыми усилиями (high-shear mixer), как в работах [19, 20]. Во втором варианте использовали роторный аппарат с подвижными лопастями [21]. Указанные два варианта реализуют процесс эксфолиации графита в периодическом режиме. В третьем варианте использовали роторный аппарат с подвижными лопастями, работающий в непрерывном режиме [22]. На рисунке 1 показана схема роторного аппарата и механизмы расслаивания (эксфолиации) частиц графита по первому варианту.

Авторы работы [19] считают, что эксфолиация частиц графита осуществляется, в основном, за счет кавитации, случайных и краевых столкновений, которые происходят при прохождении ча-

стиц через отверстия в статоре. Экспериментальные исследования показали, что более эффективно эксфолиация происходит при сдвиговых воздействиях на частицу графита непосредственно твердыми рабочими органами (подвижными лопастями) [23].

Схемы роторных аппаратов с подвижными лопастями, которые использовались при реализации экспериментов по второму и третьему вариантам показаны на рисунке 2.

Все аппараты имели одинаковый внутренний диаметр статора – 40мм. В аппарате, показанном на рисунке 1, зазор между внутренней поверхностью статора и лопастями ротора был равен 0,1 мм, то есть такой же, как в аппаратах [19, 20]. В аппаратах (рис. 2) лопасти, под действием центробежных сил прижимались к внутренней поверхности статора.

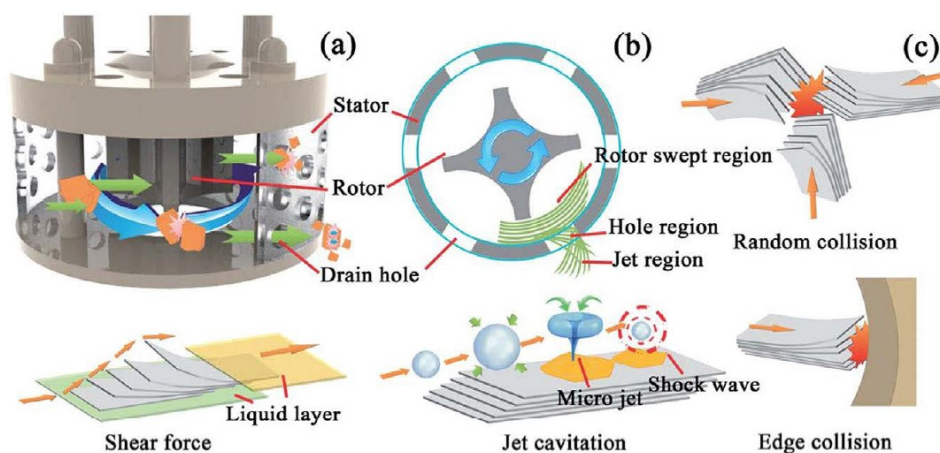
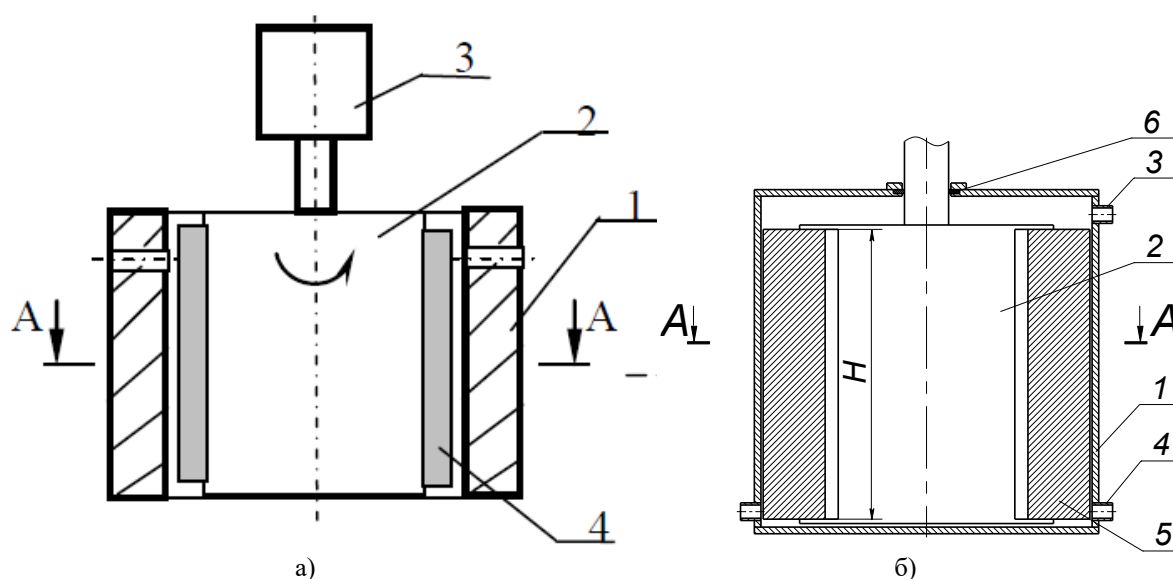


Рис. 1. Схемы роторного аппарата и механизмов расслаивания частиц графита [19]

Рис. 2. Схемы роторных аппаратов с подвижными лопастями:
а – аппарат периодического действия; б – аппарат непрерывного действия**Методика проведения экспериментов.**

Для определения основных зависимостей влияния режимных и геометрических параметров на интенсивность и эффективность процесса эксфолиации графита были проанализированы результаты проведенных исследований [19, 20]. По результатам исследований с роторами диаметром 12, 16 и 32 мм, было установлено, что зависимость изменения концентрации графеновых пластин в суспензии, при исходной концентрации графита 5 %, от диаметра ротора, для инженерных расчетов можно считать линейной, но при обязательном выполнении условия, что скорость сдвига больше 10^4 с^{-1} . Данное условие выполняется за счет изменения скорости вращения ротора. Для ротора с фиксированным диаметром установлено, что зависимость изменения концентрации графеновых пластин в суспензии от времени обработки, можно считать линейной. Следует отметить, что указанные зависимости про-

верены экспериментально только до концентрации графеновых пластин 0,07 мг/мл, поскольку большей концентрации на роторном аппарате данной конструкции не получено.

При проведении экспериментов по эксфолиации в периодическом режиме [19, 22] в качестве исходной суспензии использовали смесь порошка графита и воды с концентрациями графита 5 и 10 %. Объем исходной суспензии во всех опытах был равен 5 литров. Для предотвращения агломерации графеновых пластин в суспензию добавляли поверхностно активные вещества (N-метил 2 пирролидон, пластификатор СП-1), в количестве 1-3 грамма на литр. Частота вращения ротора изменялась от 5000 до 15000 об/мин.

Исходную суспензию заливали в емкость, устанавливали внутрь емкости роторный аппарат и проводили процесс эксфолиации. Каждые 5 минут из емкости отбирали 3 пробы объемом 150 мм, центрифугировали при параметрах, указан-

ных в работах [19, 20], из фильтрата формировали пробы объемом 100 мл и определяли концентрацию графеновых пластин.

При исследовании процесса эксфолиации в непрерывном режиме исходную суспензию заливали в емкость и насосом подавали во входной патрубок 3 (рис. 2б). Из патрубков 4 обработанная суспензия выливалась в дополнительную емкость. После завершения цикла обработки суспензию из дополнительной емкости переливали в

емкость для исходной суспензии и повторяли цикл обработки. Пробы для анализа отбирали и подготавливали, как было описано выше.

На рисунке 3 показаны зависимости изменения концентрации графеновых пластин в суспензии при исходной концентрации графита 5 %, внутренним диаметром статора 40 мм, частота вращения ротора 5000 об/мин.

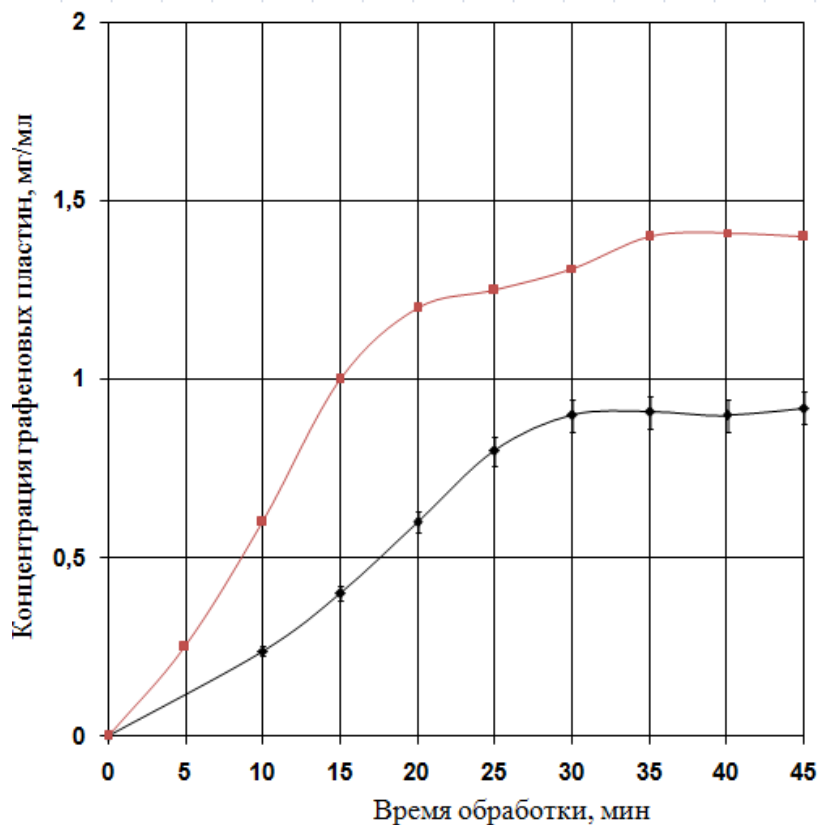


Рис. 3. Зависимости изменения концентрации графеновых пластин в суспензии: нижняя кривая – роторный аппарат [19]; верхняя кривая – роторный аппарат [21]

Из графиков видно, что при использовании аппарата с подвижными лопастями не только интенсивность процесса эксфолиации, но и предельная концентрация графеновых пластин в суспензии выше на 55 % (0,9 и 1,4 мг/мл).

На рисунке 4 показана зависимость изменения концентрации графеновых пластин в суспензии при работе роторного аппарата в непрерывном режиме.

При работе в непрерывном режиме интенсивность процесса выше, поскольку предельная концентрация графеновых пластин в суспензии достигается за 25 минут, а при работе в периодическом режиме за 35 минут. Кроме этого, при работе в непрерывном режиме предельная концентрация графеновых пластин на 7 % выше, чем при периодическом режиме. Увеличение интенсивности процесса и предельной концентрации,

по нашему мнению, можно объяснить тем, что при непрерывном режиме обеспечивается равномерная обработка суспензии, поскольку на каждом цикле весь объем суспензии проходит через роторный аппарат. Для набора статистических данных по каждому варианту эксфолиации проводились по 10 экспериментов. Таким образом, каждая точка на графиках это среднее значение концентрации 30 опытов. Следует особо отметить, что отклонения численных значений концентрации графеновых частиц от средних значений при непрерывном процессе не более 5 %, а при периодическом не менее 10 %. Это говорит о том, что процесс эксфолиации графита в непрерывном режиме осуществляется более стабильно, чем в периодическом режиме.

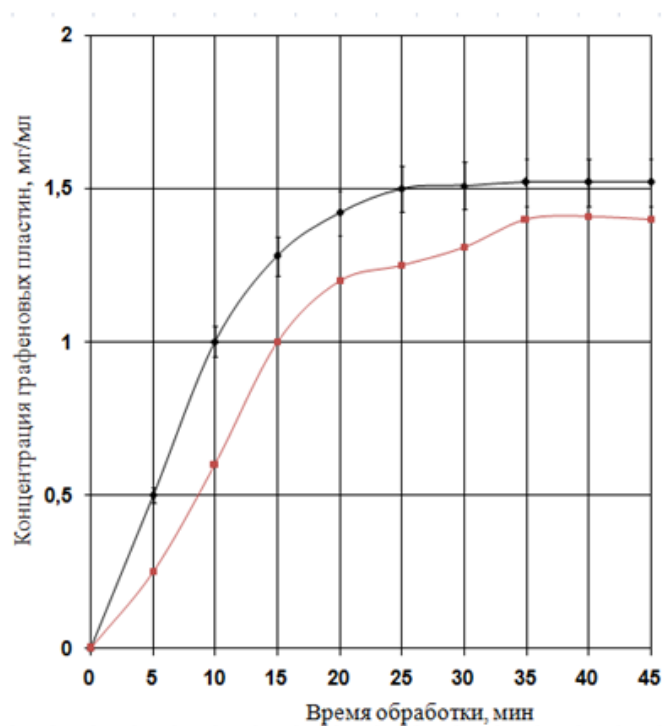


Рис. 4. Зависимости изменения концентрации графеновых пластинок в суспензии: нижняя кривая – роторный аппарат, работающий в периодическом режиме [21]; верхняя кривая – роторный аппарат, работающий в непрерывном режиме [22]

Расчет основных геометрических и режимных параметров. Расчет роторного аппарата, работающего в непрерывном режиме [22], имеет ряд принципиальных отличий от расчета аппаратов, работающих в периодическом режиме [19–21]. При работе аппаратов, работающих в периодическом режиме, объем суспензии, проходящей через зону между статором и ротором, зависит от многих параметров (диаметры статора и ротора, скорость вращения ротора, диаметр и число отверстий в статоре и другие). Более того, численное значение длины пути, пройденного отдельной частицей в указанной зоне, носит случайный характер, поскольку невозможно определить через какое отверстие частица покинет эту зону. При работе в непрерывном режиме [22] объемная производительность задается насосом, который подает суспензию в зону между статором и ротором. Кроме этого каждая частица проходит путь от верхнего отверстия, в которое подается суспензия по винтовой линии до нижнего отверстия, через которое суспензия выходит из аппарата (рис. 2б). Таким образом, в данном случае достаточно просто определять время, за которое осуществляется один цикл обработки суспензии определенного объема и среднюю длину пути частиц в зоне между статором и ротором. Результаты многочисленных экспериментов показали, что концентрация графеновых пластинок в суспензии прямо пропорциональна: концентрации графита в исходной суспензии; длине пути частицы в зоне между статором и ротором за

один цикл обработки; числу циклов обработки. Определить аналитически изменение концентрации графеновых пластинок за один цикл обработки пока не представляется возможным, поэтому необходимо определить это значение на лабораторной установке и осуществить масштабный переход к промышленному аппарату.

Определим производительность промышленного аппарата с фиксированными геометрическими и режимными параметрами, если известна концентрация графеновых пластинок за один цикл обработки на лабораторной установке C_{IL} . Пусть параметры промышленного аппарата равны: R_S – радиус статора, м; R_R – радиус ротора, м; H_R – высота ротора, м; ω – угловая скорость вращения ротора, c^{-1} ; Q_S – объемная производительность насоса, подающего суспензию в аппарат, m^3/c ; V_S – объем обрабатываемой суспензии. Поскольку в начале процесса концентрация графеновых пластинок в суспензии увеличивается прямо пропорционально числу циклов обработки, определим основные параметры одного цикла обработки.

Длина пути, пройденного частицей в зоне эксфолиации за один цикл обработки:

$$L_I = 2\pi R_S \omega \tau_E, \quad (1)$$

где τ_E – время пребывания частицы в зоне эксфолиации, с.

Время τ_E равно:

$$\tau_E = V_{RS} / Q_S = \pi(R_S^2 - R_R^2)H_R / Q_S, \quad (2)$$

где V_{RS} – объем между статором и ротором, m^3 .

После подстановки (2) в (1) получаем:

$$L_I = 2\pi^2 R_S \omega (R_S^2 - R_R^2) H_R / Q_S. \quad (3)$$

Концентрация графеновых пластин в суспензии после одного цикла обработки равна:

$$C_I = C_{IL} (L_I / L_{IL}), \quad (4)$$

где C_I – концентрация после одного цикла обработки, а нижний индекс L относится к лабораторной установке.

Время одного цикла обработки τ_I равно:

$$C(\tau) = C_{IL} [(R_S \omega (R_S^2 - R_R^2) H_R / Q_S) / R_{SL} \omega_L (R_{SL}^2 - R_{RL}^2) H_{RL} / Q_{SL}] \tau Q_S C_0 / V_S C_{0L}, \quad (8)$$

где C_{IL} – концентрация графеновых пластин в суспензии после одного цикла обработки в лабораторной установке, C_{0L} и C_0 – концентрации графита в исходной суспензии лабораторной и промышленной установки, соответственно.

В зависимость (8) входят все основные параметры проектируемой установки.

Производительность установки, в пересчете на сухие графеновые пластины равна:

$$Q_G = V C(\tau) / \tau.$$

Выводы. Получены аналитические зависимости для расчета основных геометрических и режимных параметров роторного аппарата для получения графеносодержащих суспензий методом жидкофазной сдвиговой эксфолиации графита. Эти зависимости можно использовать для расчета производительности действующего аппарата при изменении режимных параметров, а также для расчета геометрических и режимных параметров проектируемого аппарата с заданной производительностью по сухим графеновым пластинам. При проектировании нового аппарата расчет производится методом последовательных приближений с изменением параметров в рекомендуемых диапазонах. Например, концентрацию графита в исходной суспензии можно изменять в диапазоне от 5 до 20 мас. %. Зазор между статором и ротором рекомендуется принимать от 1 до 3 мм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lavagna L., Massella D., Priola E., Pavese M. Relationship between oxygen content of graphene and mechanical properties of cement-based composites // *Cement and Concrete Composites*. 2021. Vol. 115. 103851. doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.10385
2. Qureshi T. S., Panesar D. K. Nano reinforced cement paste composite with functionalized graphene and pristine graphene nanoplatelets // *Composites Part B: Engineering*. 2020. Vol. 197. P. 108063. doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108063
3. Pei C., Ueda T., Zhu J. Investigation of the effectiveness of graphene/polyvinyl alcohol on the

$$\tau_I = V_S / Q_S. \quad (5)$$

Число циклов обработки N за время τ равно:

$$N = \tau / \tau_I. \quad (6)$$

Концентрация графеновых пластин в суспензии $C(\tau)$ к моменту времени τ равно:

$$C(\tau) = C_I (\tau_I / \tau) N. \quad (7)$$

После подстановки (3-6) в (7) получаем:

mechanical and electrical properties of cement composites // *Materials and Structures*. 2020. Vol. 53 (3). doi.org/10.1617/s11527-020-01508-6

4. Ho V.D., Ng C.T., Coghlan C.J., Goodwin A., Mc Guckin C., Ozbakkaloglu T., Losic D. Electrochemically produced graphene with ultra large particles enhances mechanical properties of Portland cement mortar // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 234. 117403. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117403

5. Naeem M., Kuan H., Michelmor A., Meng Q., Qiu A., Aakyir M., Losic D., Zhu S., Ma J. A new method for preparation of functionalized graphene and its epoxy nanocomposites // *Composites Part B: Engineering*. 2020. Vol. 196. 108096. doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108096

6. Duan W., Chen Y., Ma J., Wang W., Cheng J., Zhang J. High-performance graphene reinforced epoxy nanocomposites using benzyl glycidyl ether as a dispersant and surface modifier // *Composites Part B: Engineering*. 2020. Vol. 189. 107878. doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107878

7. Zhang Z., Zhang W., Li D., Sun Y. Mechanical and Anticorrosive Properties of Graphene/Epoxy Resin Composites Coating Prepared by in-Situ Method // *International Journal of Molecular Sciences*. 2015. Vol. 16. Pp. 2239–2251.

8. Ponnammma D., Yin Y., Salim N., Parameswaranpillai J., Thomas S., Hameed N. Recent progress and multifunctional applications of 3D printed graphene nanocomposites // *Composites Part B: Engineering*. 2021. Vol. 204. 108493. doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108493

9. Dollekamp E., Bampoulis P., Siekman M.H., Kooij S.E., Zandvliet H. J. W. Tuning the Friction of Graphene on Mica by Alcohol Intercalation // *Langmuir*. 2019. № 14. Pp. 4886–4892. doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b00471

10. Wang H., Zhang Y., Yin Z., Su Y., Zhang Y., Cao J. Experimental research on tribological properties of liquid phase exfoliated graphene as an additive in -30 SAE 10W lubricating oil // *Tribology International*. 2019. Vol. 135. Pp. 29–37. doi.org/10.1016/j.triboint.2019.02.030

11. Zheng F., Duan F. Atomistic mechanism of the weakened wear resistance of few-layer graphene

induced by point defects // *Tribology International*. 2019. Vol. 134. Pp. 87–92. doi.org/10.1016/j.triboint.2019.01.035

12. Missala T., Szweczyk R., Winiarski W. Study on Tribological Properties of Lubricating Grease with Additive of Graphene // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2015. № 352. Pp. 181–187. doi: 10.1007/978-3-319-15835-8_20

13. Bellani S., Petroni E., Castillo A. E. Del Rio, Curreli N., Martín-García B., Oropesa-Nuñez R., Prato M., Bonaccorso F. Scalable Production of Graphene Inks via Wet-Jet Milling Exfoliation for Screen-Printed Micro-Supercapacitors // *Advanced Functional Materials*. 2019. Vol. 29. 1807659. doi.org/10.1002/adfm.201807659

14. Xu L., Lv W., Shi K., Xiao S., You C., He Y., Kang F., Yang Q. Holey graphenes as the conductive additives for LiFePO_4 batteries with an excellent rate performance // *Carbon* 2019. Vol. 149. Pp. 257–262. doi.org/10.1016/j.carbon.2019.04.025

15. Kumar P., Wani M.F. Synthesis and tribological properties of graphene: A review // *Journal Tribologi* 2017. №13. Pp. 36–71.

16. Zhang Y., Small J.P., Pontius W.V., Kim P. Fabrication and electric-field-dependent transport measurements of mesoscopic graphite devices // *Applied Physics Letters*. 2005. №86(7). 073104.

17. Mattevi C., Kim H., Chhowalla M.. A review of chemical vapour deposition of graphene on copper // *Journal of Materials Chemistry*. 2011. №21(10). Pp. 3324–3334.

18. Shankman R. S. U.S. Patent No. 9,023,308. 2015. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

19. Paton K.R., Varrla E., Backes C., Smith R.J., Khan U., O'Neill A., Boland C., Lotya M., Isstrate O.M., King P., Higgins T., Barwich S., May P., Puczkarski P., Ahmed I., Moebius M., Pettersson H.,

Long E., Coelho J., O'Brien S.E., McGuire E.K., Sanchez B.M., Duesberg G.S., McEvoy N., Pennycook T.J., Downing C., Crossley A., Nicolosi V., Coleman J.N. Scalable production of large quantities of defect-free few-layer graphene by shear exfoliation in liquids // *Nature Materials*. 2014. Vol. 13. Pp. 624–630

20. Dimov D., Amit I., Gorrie O., Barnes M. D., Townsend N. J., Neves Ana I. S., Withers F., Russo S., Craciun M.F. Ultrahigh performance nanoengineered graphene–concrete composites for multifunctional applications // *Advanced Functional Materials*. 2018. 1705183.

21. Пат. 2720684, Российская Федерация, МПК С 01 В 32/186. Способ получения графено-содержащих суспензий и устройство для его реализации / В.Ф. Першин, К.А.Х. Аль-Шиблави, А.М.Р. Аль-Машхадани, В.Н. Артемов, А.М. Воробьев, С.А. Киселев, Д.Д. Мелехин, Н.Р. Меметов, А.А. Осипов, А.А. Пасько, А.Г. Ткачев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО "ТГТУ". № .2019101764; заявл. 13.03.2019; опубл. 12.05.2020, Бюл. №14. 10 с.

22. Пат. 2737925, Российская Федерация, МПК С 01 В 32/186. Способ получения графено-содержащих суспензий эксфолиацией графита и устройство для его реализации / В.Ф. Першин, Р.А. Аль-Джарах, В. Мансур, А.А. Баранов, А.М. Воробьев, Д.Д. Мелехин, Н.Р. Меметов, А.А. Осипов, А.А. Пасько, А.Г. Ткачев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО "ТГТУ". № .201914021; заявл. 12.12.2019; опубл. 04.12.2020, Бюл. №34. 10 с. Патентообладатель ФГБОУ ВО "ТГТУ". 2019. Бюл. №34. 10 с.

23. Аль-Шиблави К. А. Пасько А. А., Першин В. Ф. Моделирование процесса получения графеновых структур жидкофазной сдвиговой эксфолиацией графита // *Вестник ТГТУ*. 2018. Т. 24. № 4. С. 717–726.

Информация об авторах

Аль-Джарах Руаа Амер, аспирант. E-mail: ruaa.aljarah@gmail.com. Тамбовский государственный технический университет. Россия, 392000, Тамбов, ул. Советская, д. 106.

Осипов Алексей Александрович, кандидат технических наук, начальник цеха. E-mail: aleksey.osipov@mail.ru. АО «ЗАВКОМ». Россия, 392000, Тамбов, ул. Советская, д. 51.

Першин Владимир Федорович, доктор технических наук, профессор кафедры техники и технологии производства нанопроductов. E-mail: pershin.home@mail.ru. Тамбовский государственный технический университет. Россия, 392000, Тамбов, ул. Советская, д. 106.

Поступила 13.08.2021 г.

© Аль-Джарах Р.А., Осипов А.А., Першин В.Ф., 2022

¹*Al-Jarah R.A.,* ²*Osipov A.A.,* ^{1,*}*Pershin V.F.*¹*Tambov State Technical University*²*JSC "ZAVKOM"***E-mail: pershin.home@mail.ru*

CALCULATION OF ROTARY APPARATUS FOR PRODUCTION OF GRAPHENE-CONTAINING SUSPENSIONS

Abstract. *The calculation of a rotary apparatus with movable blades for the production of graphene-containing suspensions is considered. It is used to modify structural and functional materials with improved performance characteristics. The rationale is given for the expediency of obtaining graphene plates by the method of shear exfoliation of graphite directly in liquids that are part of these materials. Experimental studies of the exfoliation process with three variants of the rotary apparatus have been carried out. In the first variant, a high-shear mixer is used. In the second variant, there is a rotary apparatus with movable blades. These two options implement the process of exfoliation of graphite in a batch mode. In the third variant, a rotary apparatus with movable blades operating in a continuous mode is used. When operating in a batch mode, the suspension enters the rotary apparatus in a random manner. It does not guarantee its uniform processing. In continuous mode, the suspension is supplied by a pump with an adjustable capacity. It allows the uniformly treating the entire suspension and controlling the residence time of the suspension in the exfoliation zone. The kinetics of the exfoliation process in inorganic and organic liquids has been investigated. The exfoliation process is carried out most effectively in a continuous mode. In result, dependences are proposed for calculating the main operating and geometric parameters of rotary apparatus with movable blades*

Keywords: *graphene plates, shear exfoliation, limiting concentration, concrete, epoxy resin, plastic lubricant, modifier.*

REFERENCES

1. Lavagna L., Massella D., Priola E., Pavese M. Relationship between oxygen content of graphene and mechanical properties of cement-based composites. *Cement and Concrete Composites*. 2021. Vol. 115. 103851. doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.10385
2. Qureshi T.S., Panesar D.K. Nano reinforced cement paste composite with functionalized graphene and pristine graphene nanoplatelets. *Composites Part B: Engineering*. 2020. Vol. 197. 108063. doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108063
3. Pei C., Ueda T., Zhu J. Investigation of the effectiveness of graphene/polyvinyl alcohol on the mechanical and electrical properties of cement composites. *Materials and Structures*. 2020. Vol. 53 (3). doi.org/10.1617/s11527-020-01508-6
4. Ho V.D., Ng C.T., Coghlan C.J., Goodwin A., Mc Guckin C., Ozbakkaloglu T., Losic D. Electrochemically produced graphene with ultra large particles enhances mechanical properties of Portland cement mortar. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 234. 117403. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117403
5. Naeem M., Kuan H., Michelmor A., Meng Q., Qiu A., Aakyir M., Losic D., Zhu S., Ma J. A new method for preparation of functionalized graphene and its epoxy nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*. 2020. Vol. 196. 108096. doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108096
6. Duan W., Chen Y., Ma J., Wang W., Cheng J., Zhang J. High-performance graphene reinforced epoxy nanocomposites using benzyl glycidyl ether as a dispersant and surface modifier. *Composites Part B: Engineering*. 2020. Vol. 189. 107878. doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107878
7. Zhang Z., Zhang W., Li D., Sun Y. Mechanical and Anticorrosive Properties of Graphene/Epoxy Resin Composites Coating Prepared by in-Situ Method. *International Journal of Molecular Sciences*. 2015. Vol. 16. Pp. 2239–2251.
8. Ponnamm D., Yin Y., Salim N., Parameswaranpillai J., Thomas S., Hameed N. Recent progress and multifunctional applications of 3D printed graphene nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*. 2021. Vol. 204. 108493. doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108493
9. Dollekamp E., Bampoulis P., Siekman M.H., Kooij S.E., Zandvliet H.J.W. Tuning the Friction of Graphene on Mica by Alcohol Intercalation. *Langmuir*. 2019. No. 14. Pp. 4886–4892. doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b00471
10. Wang H., Zhang Y., Yin Z., Su Y., Zhang Y., Cao J. Experimental research on tribological properties of liquid phase exfoliated graphene as an additive in -30 SAE 10W lubricating oil. *Tribology International*. 2019. Vol. 135. Pp. 29–37. doi.org/10.1016/j.triboint.2019.02.030
11. Zheng F., Duan F. Atomistic mechanism of the weakened wear resistance of few-layer graphene induced by point defects. *Tribology International*. 2019. Vol. 134. Pp. 87–92. doi.org/10.1016/j.triboint.2019.01.035
12. Missala T., Szweczyk R., Winiarski W. Study on Tribological Properties of Lubricating

Grease with Additive of Graphene. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2015. No. 352. Pp.181–187. doi: 10.1007/978-3-319-15835-8_20

13. Bellani S., Petroni E., Castillo A. E. Del Rio, Curreli N., Martín-García B., Oropesa-Nuñez R., Prato M., Bonaccorso F. Scalable Production of Graphene Inks via Wet-Jet Milling Exfoliation for Screen-Printed Micro-Supercapacitors. *Advanced Functional Materials*. 2019. Vol. 29. 1807659. doi.org/10.1002/adfm.201807659

14. Xu L., Lv W., Shi K., Xiao S., You C., He Y., Kang F., Yang Q. Holey graphenes as the conductive additives for LiFePO₄ batteries with an excellent rate performance. *Carbon* 2019. Vol. 149. Pp. 257–262. doi.org/10.1016/j.carbon.2019.04.025

15. Kumar P., Wani M.F. Synthesis and tribological properties of graphene: A review. *Journal Tribologi* 2017. No. 13. Pp. 36–71.

16. Zhang Y., Small J. P., Pontius W. V., Kim P. Fabrication and electric-field-dependent transport measurements of mesoscopic graphite devices. *Applied Physics Letters*. 2005. No. 86(7). 073104.

17. Mattevi C., Kim H., Chhowalla M. A review of chemical vapour deposition of graphene on copper. *Journal of Materials Chemistry*. 2011. No. 21(10). Pp. 3324–3334.

18. Shankman R. S. U.S. Patent No. 9,023,308. 2015. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

19. Paton K.R., Varrla E., Backes C., Smith R.J., Khan U., O'Neill A., Boland C., Lotya M., Isstrate O.M., King P., Higgins T., Barwich S., May P., Puczkarski P., Ahmed I., Moebius M., Pettersson H.,

Long E., Coelho J., O'Brien S.E., McGuire E.K., Sanchez B.M., Duesberg G.S., McEvoy N., Pennycook T.J., Downing C., Crossley A., Nicolosi V., Coleman J.N. Scalable production of large quantities of defect-free few-layer graphene by shear exfoliation in liquids. *Nature Materials*. 2014. Vol. 13. Pp. 624–630

20. Dimov D., Amit I., Gorrie O., Barnes M. D., Townsend N. J., Neves Ana I. S., Withers F., Russo S., Craciun M.F. Ultrahigh performance nanoengineered graphene–concrete composites for multifunctional applications. *Advanced Functional Materials*. 2018. 1705183.

21. Pershin V.F., Al-Shiblavi K.A.Kh., Al-Mashhadani A.M.R., Artemov V.N., Vorobiev A.M., Kiselev S.A., Melekhin D.D., Memetov N.R., Osipov A.A., Pasko A.A., Tkachev A.G. A method of obtaining graphene-containing suspensions and a device for its implementation. Patent RF, no. 2720684, 2019.

22. Pershin V.F., Al-Jahar R.A., Mansur V., Baranov A.A., Vorobiev A.M., Melekhin D.D., Memetov N.R., Osipov A.A., Pasko A.A., Tkachev A.G. A method of obtaining graphene-containing suspensions by exfoliation of graphite and a device for its implementation. Patent RF, no. 2737925, 2019.

23. Al-Shiblavi K.A., Pasko A.A., Pershin V. F. Modeling of the process of obtaining graphene structures by liquid-phase shear exfoliation of graphite [Modelirovanie processa polucheniya grafenovykh struktur zhidkofaznoj sdvigovoj eksfoliaciej grafita]. *Bulletin of TSTU*. 2018. Vol. 24. No. 4. Pp. 717–726 (rus)

Information about the authors

Al-Jarah Ruaa Amer, PhD student. E-mail: ruaa.aljarah@gmail.com. Tambov State Technical university. Russia, 392000, Tambov, st. Sovetskaya, 106

Osipov, Aleksey A. candidate of technical sciences, shop manager. E-mail: aleksey.osipov@mail.ru. JSC "ZAVKOM". Russia, 392000, Tambov, st. Sovetskaya, 51

Pershin, Vladimir F. Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Engineering and Technology for the Production of Nanoproducs. E-mail: pershin.home@mail.ru. Tambov State Technical University. Russia, 392000, Tambov, st. Sovetskaya, 106

Received 13.08.2021

Для цитирования:

Аль-Джарах Р.А., Осипов А.А., Першин В.Ф. Расчет роторного аппарата для производства графеносодержащих суспензий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 1. С. 112–120. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-112-120

For citation:

Al-Jarah R.A., Osipov A.A., Pershin V.F. Calculation of rotary apparatus for production of graphene-containing suspensions. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2022. No. 1. Pp. 112–120. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-112-120

